

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Aplikace moderních proudových aktivních prvků při realizaci
nelineárních obvodů**

**Application of Modern Current Active Elements in the
Implementation of Nonlinear Circuits**

2014

David Hájek

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student:

David Hájek

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Aplikace moderních proudových aktivních prvků při realizaci
nelineárních obvodů
Application of Modern Current Active Elements in the Implementation
of Nonlinear Circuits

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte přehled aktivních prvků pracujících v proudovém a smíšeném režimu.
2. Zpracujte přehled aplikací těchto prvků při realizaci nelineárních obvodů (komparátory, operační usměrňovače).
3. Uvedená zapojení experimentálně ověřte.

Seznam doporučené odborné literatury:

BRTNÍK, Bohumil. *Analogové soustavy*. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2013. str. 176. ISBN 978-80-7300-490-3.

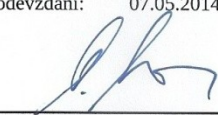
Vlastní literární rešerše k řešené problematice.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Tesař**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 5. května 2014

Hláš David
.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval **Ing. Zdeňku Tesaři** za odbornou pomoc, konzultaci a hlavně podporu při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Účelem této bakalářské práce je vypracovat přehled aktivních prvků pracujících v proudovém a smíšeném režimu, přehled aplikací těchto prvků při realizaci nelineárních obvodů, jako jsou komparátory, operační usměrňovače, a jejich uvedená zapojení experimentálně ověřit. Hlavním stavebním prvkem v této práci bude komerčně dostupný pozitivní proudový konvektor druhé generace, tedy operační zesilovač AD844, se kterým budou realizovány všechny navržené obvody.

Klíčová slova

Aktivní prvky, proudový a smíšený režim, nelineární obvody, komparátory, operační usměrňovače, pozitivní proudový konvektor druhé generace, operační zesilovač AD844.

Abstract

The purpose of this bachelor work is to dispose overview of active elements working in current and mixed mode, overview of application these elements in the implementation of nonlinear circuits like a comparator, operational amplifier and their specified engagement experimentally verify. The main structural element of this work will be commercially available positive current conveyor of second generation, in that case operational amplifier AD844, which will be implemented the all proposed circuits.

Key words

Active elements, current and mixed mode, nonlinear circuits, comparator, operational amplifier, positive current conveyor of second generation, operational amplifier AD844.

Seznam použitých symbolů

| Symbol | Jednotky | Význam symbolu |
|------------|----------|--------------------------|
| C | [F] | Kapacita |
| D1 | [-] | Dioda 1 |
| D2 | [-] | Dioda 2 |
| D3 | [-] | Dioda 3 |
| D4 | [-] | Dioda 4 |
| GND | [-] | Uzemnění |
| I_0 | [A] | Řídicí proud |
| I_1 | [A] | Proud tekoucí T1 |
| I_2 | [A] | Proud tekoucí T2 |
| I_B | [A] | Proud báze |
| I_d | [A] | Usměrněný proud |
| I_{KH} | [A] | Proud vysoké hladiny |
| I_{KL} | [A] | Proud nízké hladiny |
| I_N | [A] | Vstupní proud N |
| I_P | [A] | Vstupní proud P |
| I_{VST} | [A] | Vstupní proud |
| $I_{VÝST}$ | [A] | Výstupní proud |
| I_X | [A] | Proud na svorce X |
| I_{X1} | [A] | Proud na svorce X_1 |
| I_{X2} | [A] | Proud na svorce X_2 |
| I_{X3} | [A] | Proud na svorce X_3 |
| I_{X4} | [A] | Proud na svorce X_4 |
| I_{X12} | [A] | Proud na svorce X_{12} |
| I_{X34} | [A] | Proud na svorce X_{34} |
| I_Y | [A] | Proud na svorce Y |
| I_Z | [A] | Proud na svorce Z |
| I_{Z1} | [A] | Proud na svorce Z_1 |
| I_{Z2} | [A] | Proud na svorce Z_2 |

| | | |
|-----------|------|-----------------------|
| I_{Z3} | [A] | Proud na svorce Z_3 |
| I_{Z4} | [A] | Proud na svorce Z_4 |
| I_{2N} | [A] | Výstupní proud 2_N |
| I_{2P} | [A] | Výstupní proud 2_P |
| L | [H] | Indukčnost |
| N | [-] | Počet bran |
| $P_{Y/X}$ | [-] | Signálový přenos |
| R | [Ω] | Odpor |
| R_a | [Ω] | Odpor a |
| R_b | [Ω] | Odpor b |
| R_X | [Ω] | Odpor X |
| R_Z | [Ω] | Odpor Z |
| R_1 | [Ω] | Odpor 1 |
| R_2 | [Ω] | Odpor 2 |
| R_3 | [Ω] | Odpor 3 |
| T | [Hz] | Perioda |
| $T1$ | [-] | Tranzistor |
| $T2$ | [-] | Tranzistor |
| $T3$ | [-] | Tranzistor |
| $T4$ | [-] | Tranzistor |
| $T5$ | [-] | Proudové zrcadlo |
| $T6$ | [-] | Proudové zrcadlo |
| $T7$ | [-] | Proudové zrcadlo |
| $T8$ | [-] | Proudové zrcadlo |
| $T9$ | [-] | Proudový zdroj |
| $T10$ | [-] | Proudový zdroj |
| U_{EF} | [V] | Efektivní hodnota |
| U_{BE1} | [V] | Napětí báze emitoru 1 |
| U_{BE2} | [V] | Napětí báze emitoru 2 |
| U_d | [V] | Rozdílové napětí |
| U_{HYS} | [V] | Hysterezní napětí |

| | | |
|--------------|-----|---------------------------|
| U_i | [V] | Napětí na inv. vstupu |
| U_{KH} | [V] | Napětí vysoké hladiny |
| U_{KL} | [V] | Napětí nízké hladiny |
| U_N | [V] | Napětí na výstupu N |
| U_P | [V] | Napětí na výstupu P |
| U_{PP} | [V] | Napětí z generátoru |
| U_{R1} | [V] | Úbytek napětí na R1 |
| U_{REF} | [V] | Referenční napětí |
| U_T | [V] | Napětí při periodě T |
| U_{VST} | [V] | Vstupní napětí |
| U_{VYST} | [V] | Výstupní napětí |
| U_X | [V] | Napětí na svorce X |
| U_{X1} | [V] | Napětí na svorce X_1 |
| U_{X2} | [V] | Napětí na svorce X_2 |
| U_{X3} | [V] | Napětí na svorce X_3 |
| U_{X4} | [V] | Napětí na svorce X_4 |
| U_Y | [V] | Napětí na svorce Y |
| U_{Y1} | [V] | Napětí na svorce Y_1 |
| U_{Y2} | [V] | Napětí na svorce Y_2 |
| U_{Y3} | [V] | Napětí na svorce Y_3 |
| U_{Y4} | [V] | Napětí na svorce Y_4 |
| U_Z | [V] | Napětí na svorce Z |
| U_{Z1} | [V] | Napětí na svorce Z_1 |
| U_{Z1SAT} | [V] | Saturační napětí na Z_1 |
| U_{EF} | [V] | Efektivní hodnota |
| U_{1N} | [V] | Výstupní napětí 1_N |
| U_{1P} | [V] | Výstupní napětí 1_P |
| U_{2N} | [V] | Výstupní napětí 2_N |
| U_{2P} | [V] | Výstupní napětí 2_P |
| U_{2SAT}^+ | [V] | Kladné saturační napětí |

| | | |
|-------------------|-----|---------------------------|
| U_{2SAT}^- | [V] | Záporné saturační napětí |
| U_{2SAT} | [V] | Saturační napětí |
| $U_{STŘ}$ | [V] | Střední hodnota |
| X | [-] | Proudová vstupní brána |
| $X+$ | [-] | Výstupní napěťová svorka |
| $X-$ | [-] | Výstupní napěťová svorka |
| Y | [-] | Napěťová vstupní brána |
| Y_{1+} | [-] | Kladná napěťová svorka 1 |
| Y_{2-} | [-] | Záporná napěťová svorka 2 |
| Y_{3+} | [-] | Kladná napěťová svorka 3 |
| Z | [-] | Výstupní brána Z |
| Z_X | [Ω] | Výstupní imp. vstupu X |
| Z_Y | [Ω] | Vstupní imp. vstupu Y |
| Z_Z | [Ω] | Výstupní imp. vývodu Z |
| a | [-] | Koeficient |
| b | [-] | Koeficient |
| c | [-] | Koeficient |
| g_m | [Ω] | Přenosová vodivost |
| k | [-] | Konstanta |
| l_n | [-] | Logaritmus |
| m | [-] | Konstanta |
| $+U_{CC}$ | [V] | Kladné napájecí napětí |
| $-U_{CC}$ | [V] | Záporné napájecí napětí |
| $\Delta U_{2STŘ}$ | [V] | Absolutní střední chyba |
| ΔU_{2EF} | [V] | Absolutní efektivní chyba |
| $\delta_{STŘ}$ | [%] | Relativní střední chyba |
| δ_{EF} | [%] | Relativní efektivní chyba |
| β | [-] | Konstanta |
| ∞ | [-] | Nekonečno |

Seznam použitých zkratk

| Zkratka | Význam |
|--------------------------|---|
| AD | Analog Devices |
| AD844 | Operační zesilovač |
| CC | Neinvertující proudový konvektor |
| CC+ | Neinvertující proudový konvektor pozitivní |
| CC- | Neinvertující proudový konvektor negativní |
| CFA | Konvektor se zpětnou proudovou vazbou |
| CFOA | Operační zesilovač se zpětnou proudovou vazbou |
| CCI | Neinvertující proudový konvektor první generace |
| CCII | Neinvertující proudový konvektor druhé generace |
| CCII+ | Neinvertující proudový konvektor druhé generace pozitivní |
| CCII+₁ | Neinvertující proudový konvektor druhé generace 1 |
| CCII+₂ | Neinvertující proudový konvektor druhé generace 2 |
| CCII+₃ | Neinvertující proudový konvektor druhé generace 3 |
| CCII+₄ | Neinvertující proudový konvektor druhé generace 4 |
| CCIII | Neinvertující proudový konvektor třetí generace |
| ICC | Invertující proudový konvektor |
| ICCI | Invertující proudový konvektor první generace |
| ICCI | Invertující proudový konvektor druhé generace |
| ICCI | Invertující proudový konvektor třetí generace |
| MCMI | Multi – output Current Mirror and Inverter |
| OTA | Operační transkonduktanční zesilovač |
| OPA860 | Širokopásmový operační transkonduktanční zesilovač |
| OPA861 | Širokopásmový operační transkonduktanční zesilovač |
| OSC | Osciloskop |
| TIA | Transimpedanční zesilovač |
| TI | Texas Instruments |
| RCA | Radio Corporation of America |
| UCC | Univerzální proudový konvektor |

Seznam obrázků

| | | |
|---------------|---|--------|
| Obrázek 1.1: | Schématická značka CCII+..... | - 18 - |
| Obrázek 1.2: | Ideální model current conveyoru | - 19 - |
| Obrázek 1.3: | Matice proudového konveju | - 19 - |
| Obrázek 1.4: | Principiální schéma obvodu current conveyoru | - 21 - |
| Obrázek 1.5: | Schématická značka ideálního transkonduktačního zesilovače | - 22 - |
| Obrázek 1.6: | Principiální zapojení transkonduktačního zesilovače OTA..... | - 23 - |
| Obrázek 1.7: | Model ideálního proudového zrcadla | - 24 - |
| Obrázek 1.8: | Proudové zrcadlo realizováno pomocí proudového konveju | - 25 - |
| Obrázek 1.9: | MCMI realizace pomocí univerzálního proudového konveju | - 25 - |
| Obrázek 1.10: | Schématická značka Transimpedančního zesilovače..... | - 26 - |
| Obrázek 1.11: | Obvodové řešení TIA..... | - 26 - |
| Obrázek 2.1: | Blokové schéma usměrňovače | - 27 - |
| Obrázek 2.2: | Jednocestný usměrňovač pro kladné vstupní napětí | - 29 - |
| Obrázek 2.3: | Výpočtové schéma..... | - 29 - |
| Obrázek 2.4: | Jednocestný usměrňovač pro záporné vstupní napětí | - 30 - |
| Obrázek 2.5: | Výpočtové schéma..... | - 30 - |
| Obrázek 2.6: | Porovnání vstupního napětí pro kladnou a zápornou hodnotu | - 31 - |
| Obrázek 2.7: | Dvoucestný usměrňovač pro kladné vstupní napětí..... | - 32 - |
| Obrázek 2.8: | Výpočtové schéma..... | - 32 - |
| Obrázek 2.9: | Dvoucestný usměrňovač pro záporné vstupní napětí..... | - 33 - |
| Obrázek 2.10: | Výpočtové schéma..... | - 34 - |
| Obrázek 2.11: | Porovnání vstupního napětí pro kladnou a zápornou hodnotu | - 34 - |
| Obrázek 2.12: | Proudový sledovač pro kladné vstupní napětí | - 35 - |
| Obrázek 2.13: | Výpočtové schéma..... | - 36 - |
| Obrázek 2.14: | Proudový sledovač pro záporné vstupní napětí..... | - 37 - |
| Obrázek 2.15: | Výpočtové schéma..... | - 37 - |
| Obrázek 2.16: | Porovnání vstupního napětí pro kladnou a zápornou hodnotu | - 38 - |
| Obrázek 2.17: | Porovnání vstupního napětí pro kladnou a zápornou hodnotu | - 39 - |
| Obrázek 2.18: | Operační usměrňovač s proudovým sledovačem pro kladný vstupní proud..... | - 39 - |
| Obrázek 2.19: | Výpočtové schéma..... | - 40 - |
| Obrázek 2.20: | Operační usměrňovač s proudovým sledovačem pro záporný vstupní proud..... | - 41 - |
| Obrázek 2.21: | Výpočtové schéma..... | - 41 - |
| Obrázek 2.22: | Porovnání vstupního proudu pro kladnou a zápornou hodnotu | - 42 - |
| Obrázek 3.1: | Obecná značka napěťového komparátoru..... | - 44 - |
| Obrázek 3.2: | Vnitřní blokové schéma komparátoru..... | - 44 - |
| Obrázek 3.3: | Schéma komparátoru bez hystereze..... | - 45 - |
| Obrázek 3.4: | Schéma komparátoru s hystezí..... | - 47 - |
| Obrázek 3.5: | Převodní charakteristika invertujícího komparátoru..... | - 48 - |
| Obrázek 3.6: | Převodní charakteristika neinvertujícího komparátoru | - 49 - |
| Obrázek 3.7: | Schéma Schmittova komparátoru pracující v proudovém režimu.... | - 50 - |
| Obrázek 3.8: | Převodní charakteristika Schmittova komparátoru..... | - 52 - |

| | |
|---|--------|
| Obrázek 4.1: Schéma realizovaného zapojení jednocestného operačního usměrňovače..... | - 53 - |
| Obrázek 4.2: Statická převodní charakteristika jednocestného operačního usměrňovače..... | - 54 - |
| Obrázek 4.3: Schéma realizovaného zapojení jednocestného operačního usměrňovače..... | - 55 - |
| Obrázek 4.4: Schéma realizovaného zapojení dvoucestného operačního usměrňovače..... | - 57 - |
| Obrázek 4.5: Statická převodní charakteristika dvoucestného operačního usměrňovače..... | - 58 - |
| Obrázek 4.6: Schéma realizovaného zapojení jednocestného operačního usměrňovače..... | - 59 - |
| Obrázek 4.7: Schéma realizovaného zapojení jednocestného operačního usměrňovače s proudovým sledovačem..... | - 61 - |
| Obrázek 4.8: Statická převodní charakteristika jednocestného operačního usměrňovače s proudovým sledovačem..... | - 62 - |
| Obrázek 4.9: Schéma realizovaného zapojení jednocestného operačního usměrňovače s proudovým sledovačem..... | - 63 - |
| Obrázek 4.10: Schéma realizovaného zapojení dvoucestného operačního usměrňovače..... | - 65 - |
| Obrázek 4.11: Statická převodní charakteristika dvoucestného operačního usměrňovače..... | - 67 - |
| Obrázek 4.12: Schéma realizovaného zapojení jednocestného operačního usměrňovače..... | - 67 - |
| Obrázek 4.13: Schéma realizovaného zapojení komparátoru s hysterezí..... | - 70 - |
| Obrázek 4.14: Statická převodní charakteristika invertujícího komparátoru..... | - 71 - |
| Obrázek 4.15: Statická převodní charakteristika neinvertujícího komparátoru..... | - 72 - |
| Obrázek 4.16: Statická převodní charakteristika komparátoru s hysterezí..... | - 73 - |
| Obrázek 4.17: Schéma realizovaného zapojení komparátoru s hysterezí..... | - 74 - |
| Obrázek 4.18: Průběh invertujícího komparátoru..... | - 74 - |
| Obrázek 4.19: Nastavení kurzorů na komparační napětí..... | - 75 - |
| Obrázek 4.20: Průběh neinvertujícího komparátoru..... | - 75 - |
| Obrázek 4.21: Nastavení kurzorů na komparační napětí..... | - 76 - |

Seznam tabulek

| | | |
|---------------|---|--------|
| Tabulka 1.1: | Různé typy tříbranných proudových konvektorů | - 20 - |
| Tabulka 2.1: | Možnosti využití operačního usměrňovače | - 43 - |
| Tabulka 4.1: | Tabulka naměřených hodnot vstupního napětí na výstupní napětí.. | - 53 - |
| Tabulka 4.2: | Tabulka naměřených hodnot generátoru vzhledem k osciloskopu.. | - 55 - |
| Tabulka 4.3: | Tabulka naměřených hodnot vstupního napětí na výstupní napětí.. | - 57 - |
| Tabulka 4.4: | Tabulka naměřených hodnot generátoru vzhledem k osciloskopu.. | - 59 - |
| Tabulka 4.5: | Tabulka naměřených hodnot vstupního napětí na výstupní napětí.. | - 61 - |
| Tabulka 4.6: | Tabulka naměřených hodnot generátoru vzhledem k osciloskopu.. | - 63 - |
| Tabulka 4.7: | Tabulka naměřených hodnot vstupního napětí na výstupní napětí.. | - 65 - |
| Tabulka 4.8: | Tabulka naměřených hodnot generátoru vzhledem k osciloskopu.. | - 68 - |
| Tabulka 4.9: | Tabulka naměřených hodnot vstupního napětí na výstupní napětí.. | - 70 - |
| Tabulka 4.10: | Tabulka naměřených hodnot vstupního napětí na výstupní napětí.. | - 71 - |

Obsah

| | |
|--|--------|
| Úvod | - 17 - |
| 1 Aktivní prvky | - 18 - |
| 1.1 Proudové konvejory | - 18 - |
| 1.2 Transkonduktanční zesilovač | - 22 - |
| 1.3 Proudové zrcadlo | - 24 - |
| 1.4 Transimpedanční zesilovač TIA | - 26 - |
| 2 Operační usměrňovače | - 27 - |
| 2.1 Operační usměrňovače obecně | - 27 - |
| 2.2 Jednocestný usměrňovač | - 28 - |
| 2.2.1 Jednocestný usměrňovač pro kladné vstupní napětí | - 28 - |
| 2.2.2 Jednocestný usměrňovač pro záporné vstupní napětí | - 30 - |
| 2.3 Dvoucestný usměrňovač | - 31 - |
| 2.3.1 Dvoucestný usměrňovač pro kladné vstupní napětí | - 31 - |
| 2.3.2 Dvoucestný usměrňovač pro záporné vstupní napětí | - 33 - |
| 2.4 Operační usměrňovač s proudovým sledovačem | - 35 - |
| 2.4.1 Operační usměrňovač s proudovým sledovačem pro kladné vstupní napětí... | - 35 - |
| 2.4.2 Operační usměrňovač s proudovým sledovačem pro záporné vstupní napětí. | - 36 - |
| 2.4.3 Operační usměrňovač s proudovým sledovačem pro kladný vstupní proud | - 39 - |
| 2.4.4 Operační usměrňovač s proudovým sledovačem pro záporný vstupní proud | - 40 - |
| 3 Komparátor | - 44 - |
| 3.1 Komparátor obecně | - 44 - |
| 3.2 Komparátor bez hystereze | - 45 - |
| 3.3 Komparátor s hysterezí | - 46 - |
| 3.4 Schmittův komparátor pracující v proudovém režimu | - 50 - |
| 4 Experimentální ověřování | - 53 - |
| 4.1 Jednocestný operační usměrňovač | - 53 - |
| 4.1.1 Měření se statickým napětím | - 53 - |
| 4.1.2 Měření s dynamickým napětím | - 55 - |

| | | |
|-------|--|--------|
| 4.2 | Dvoucestný operační usměrňovač | - 57 - |
| 4.2.1 | Měření se statickým napětím | - 57 - |
| 4.2.2 | Měření s dynamickým napětím | - 59 - |
| 4.3 | Jednocestný operační usměrňovač s proudovým sledovačem | - 61 - |
| 4.3.1 | Měření se statickým napětím | - 61 - |
| 4.3.2 | Měření s dynamickým napětím | - 63 - |
| 4.4 | Dvoucestný operační usměrňovač s proudovým sledovačem | - 65 - |
| 4.4.1 | Měření se statickým napětím | - 65 - |
| 4.4.2 | Měření s dynamickým napětím | - 67 - |
| 4.5 | Komparátor s hysterezí | - 69 - |
| 4.5.1 | Měření se statickým napětím | - 69 - |
| 4.5.2 | Měření s dynamickým napětím | - 73 - |
| 5 | Závěr | - 77 - |
| | Seznam použité literatury | - 78 - |
| | Seznam příloh | - 80 - |

Úvod

Bakalářská práce je rozdělena na dvě části, teoretickou a praktickou část. Každá část obsahuje několik kapitol k dané problematice. Budu se zde zabývat přehledem aktivních prvků pracujících v proudovém a smíšeném režimu, přehledem aplikací těchto prvků při realizaci nelineárních obvodů a v poslední řadě experimentálním ověřením uvedených zapojení.

Jako první kapitolu jsem zvolil popis aktivních prvků, kde především budu mluvit o proudových konvejech, jelikož je to hlavní stavební prvek v následujících navrhovaných zapojeních. Dále budu popisovat proudové zrcadlo, transimpedanční zesilovač a transkonduktanční zesilovač. Ke každé oblasti jsem se snažil v jednoduchosti a zkratce vyjádřit danou problematiku.

Druhá kapitola se zabývá operačními usměrňovači, kde jsem popsal obecný princip jejich funkčnosti a následně navrhl jednotlivá zapojení. Zapojení jsou realizována právě pomocí konvejorů v zapojení jednocestným, dvoucestným operačním usměrňovačem a operačním usměrňovačem s proudovým zesilovačem. Každý obvod je teoreticky popsán pro přivedené kladné a záporné napětí, nebo pro přivedený kladný a záporný proud.

Ve třetí kapitole pokračuji v navrhovaných zapojeních, kde realizuji pomocí konvejorů obvody s komparátory. Začátek kapitoly je věnován obecnému popisu problematiky komparátorů a poté jsou rozebírána schémata jako komparátor bez hystereze, komparátor s hysterezí a Schmittův komparátor pracující v proudovém režimu.

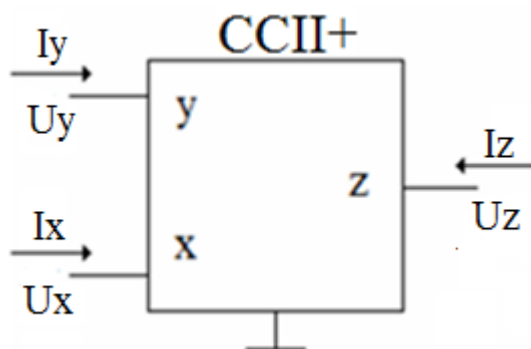
Praktická část, tedy kapitola čtvrtá, je věnována ověření funkčnosti navržených schémat. Pro experimentální ověření jsem realizoval všechny uvedené operační usměrňovače, ale jen pro napěťový vstup a výstup. Zapojení komparátoru je pouze jedno schéma, ale skrývá v sobě všechna teoreticky navržená schémata. Pro jednotlivé obvody realizuji jak statické, tak dynamické měření a všechny naměřené hodnoty zpracovávám do tabulek a grafů.

1 Aktivní prvky

Pod pojmem aktivní prvky se mohou objevovat komponenty jako operační zesilovače, konvejory, transimpedanční zesilovač, transkonduktanční zesilovač a další. Konvejory dnes nahrazují prvky pracující v napěťovém módu za prvky pracující v proudovém, nebo smíšeném režimu, díky nimž zlepšují vlastnosti realizovaných zapojení.

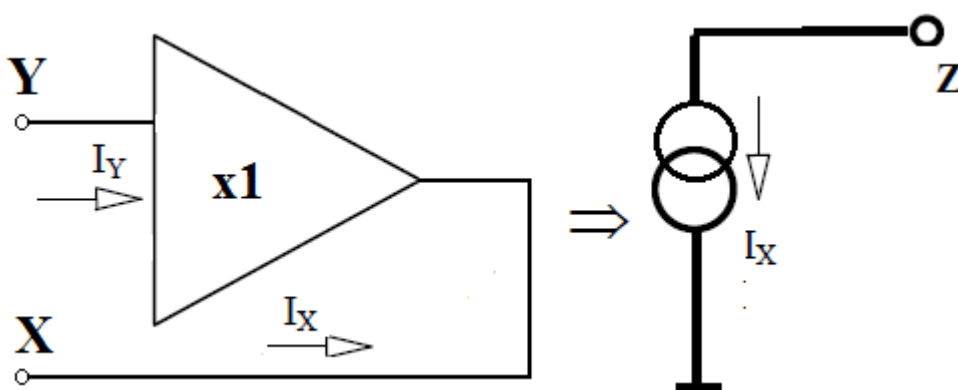
1.1 Proudové konvejory

První zmínění o proudovém konveju si připisuje K. C. Smith, který se touhle myšlenkou začal zabývat na podzim roku 1966 na Torontské Univerzitě. V roce 1968 se k němu přidal i A. Sedra a tímto zahájili první generaci proudových konvejerů CCI pomocí bipolární technologie [1]. V tomhle období ale byly nejvíce rozšířené operační zesilovače, jelikož proudový konvejer teprve začínal a neměl definované žádné výhody. Pár let poté, tedy v roce 1970, se stejní autoři zasloužili o představení proudového konvejeru CCII druhé generace, který oproti svému předchůdci byl rozšířen o své aplikační schopnosti [2]. MOS technologie, která se v této generaci začíná implementovat, se CCII představuje jako univerzální stavební blok. Aplikační možnosti a vlastnosti vzrostly díky rozvoji systémů v proudovém módu. CCI už není tedy tak rozšířený a začíná se prosazovat v elektronice CCII, kde se objevují první zesilovače s proudovou zpětnou vazbou (CFA). Třetí generace CCIII vznikla díky A. Fabremu, který prosadil svou vnitřní strukturu v roce 1995 [3]. V dalších letech vzniklo nespočetné množství jednotlivých návrhů proudových konvejerů. Ty se od sebe lišily například orientací, či jejich počtem výstupních a vstupních svorek (tj. konvejory se symetrickým výstupem a diferenčním vstupem, nebo invertující a neinvertující proudové konvejory) [5]. Dále se konvejory rozdělují ještě na kladné/záporné a invertující/neinvertující. S rostoucími nároky na univerzálnost konvejerů se muselo přijít s novým aktivním prvkem. To vedlo k vývoji univerzálního proudového konvejeru (UCC), s kterým je možné realizovat všechny varianty doposud známých typů proudových konvejerů [6].



Obrázek 1.1: Schematická značka CCII+

Tyto obvodové aktivní bloky mohou pracovat ve třech režimech, a to jako napěťový, proudový nebo smíšený. U moderních proudových konvektorů se zavedla jednotná forma značení jednotlivých bran (N). Většina konvektorů má pouze tři brány, kde každá z nich má jiné vlastnosti, a slouží k jinému účelu [5]. Za vžitě označování jednotlivých bran se berou písmena X, Y a Z. Brána X zde zastupuje proudovou vstupní bránu, kde je proud konvejován pomocí proudového sledovače, ale také slouží jako napěťová výstupní brána pro bránu Y. U brány Y se napěťová brána bere jako neinvertující vysokoimpedanční vstup. Výstupní brána proudového konvektoru je značena písmenem Z. Na **obrázku 1.1** je vidět, jak jsou jednotlivé brány umístěny a na **obrázku 1.2** je zobrazen ideální model [4].



Obrázek 1.2: *Ideální model proudového konvektoru*

Obecná rovnice, která platí mezi bránovými veličinami, pak bude vypadat následovně (**rovnice 1.1**) [5]:

$$V_x = a \cdot U_y, I_y = b \cdot I_x, I_z = c \cdot I_x \quad (1.1)$$

Koeficienty zde mohou nabývat hodnot (-1, 0, 1), a z toho lze odvodit matici, která uvádí vztahy mezi těmito veličinami, viz **obrázek 1.3**.

$$\begin{bmatrix} U_x \\ I_y \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a & 0 \\ b & 0 & 0 \\ c & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix}$$

Obrázek 1.3: *Matice proudového konvektoru*

Pro koeficienty uvedené v rovnici platí, že koeficient **a** je určen pro napětí a nabývá pouze hodnot (-1,1). Pokud bude **a = 1**, tak se přenesou neinvertující napětí, a označení zůstává

stejně CC. Při hodnotě $\mathbf{a} = -1$ se přenáší invertující napětí, a tím se mění označení konveju na ICC. Koeficient \mathbf{b} může nabývat tří hodnot (-1, 0, 1), kde hodnota $\mathbf{b} = -1$ udává první generaci konveju CCI, $\mathbf{b} = 0$ udává druhou CCII a hodnota $\mathbf{b} = 1$ udává třetí CCIII. Poslední koeficient \mathbf{c} nabývá, stejně jako koeficient \mathbf{a} , také jen dvou hodnot. Pro hodnotu $\mathbf{c} = 1$ platí, že se jedná o kladný, tedy pozitivní proudový konveju CC+, a pro hodnotu $\mathbf{c} = -1$ bude proudový konveju záporný, tedy negativní CC-. Aby bylo tedy dosaženo komerčně prodejného konveju CCII+, musí platit, že $\mathbf{a} = 1$, $\mathbf{b} = 0$ a $\mathbf{c} = 1$ [7]. Po prozkoumání jednotlivých kombinací je možné vytvořit až 12 rozdílných typů tříbranných konveju, které jsou uvedeny v **tabulce 1.1**.

Proudový konveju CCII+ je sice jediný komerčně prodejný, ale bez problémů dokáže nahradit moderní aktivní prvky ve funkční vnitřní blokové struktuře. Hlavními výrobci těchto konveju jsou firmy Texas Instruments a Analog Devices, kde jsou tyto prvky obsaženy v součástkách, jako jsou např. OPA860, OPA861 (TI) a AD844 (AD), viz **příloha A** [6].

Tabulka 1.1: *Různé typy tříbranných proudových konveju*

| Konveju | Koeficienty | | |
|---------|--------------|--------------|--------------|
| | \mathbf{a} | \mathbf{b} | \mathbf{c} |
| CCI+ | 1 | 1 | 1 |
| CCI- | 1 | 1 | -1 |
| CCII+ | 1 | 0 | 1 |
| CCII- | 1 | 0 | -1 |
| CCIII+ | 1 | -1 | 1 |
| CCIII- | 1 | -1 | -1 |
| ICCI+ | -1 | 1 | 1 |
| ICCI- | -1 | 1 | -1 |
| ICCII+ | -1 | 0 | 1 |
| ICCII- | -1 | 0 | -1 |
| ICCIH+ | -1 | -1 | 1 |
| ICCIH- | -1 | -1 | -1 |

Na **obrázku 1.4** lze vidět báze tranzistorů (T1, T2) tvořící neinvertující vstup Y. Proudové zdroje T9 a T10, které jsou obsaženy v emitorech, nastavují klidový pracovní bod, ale nedefinují principiální funkci. Ve skutečnosti je vstup X neinvertujícím vstupem, který je součástí vstupu Y, tj. nízkoimpedanční vstup. Emitorové sledovače (T1, T3) a (T2, T4)

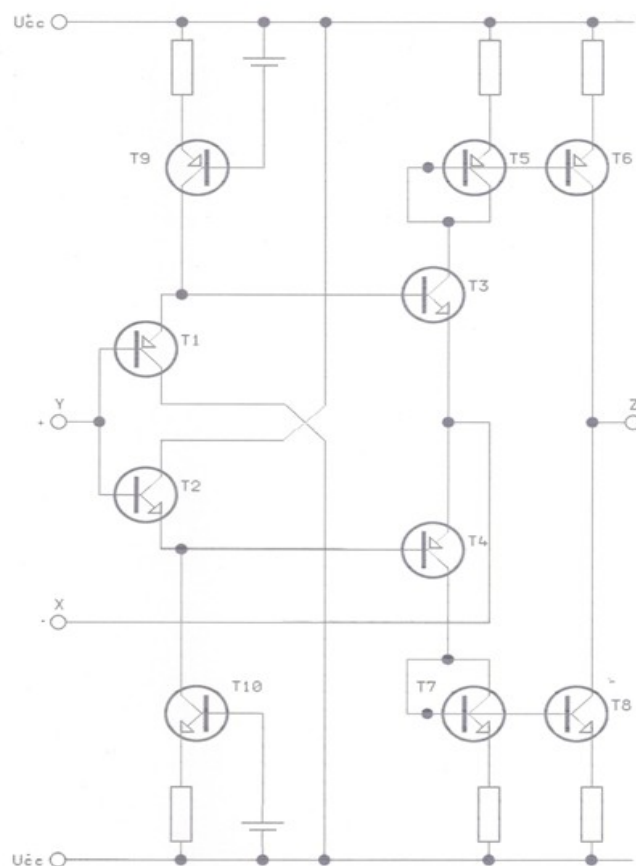
jsou zařazeny mezi póly Y a X. V ideálním případě signálový přenos $P_{Y/X}$ je roven jedné, což může připomínat zesilovač se zpětnou proudovou vazbou, ale zde podobnost končí. Proudová zrcadla (T5, T6) a (T7, T8) jsou zařazena v kolektorech tranzistorů T3 a T4, které zaručují platnost vztahu (**rovnice 1.2**):

$$I_X = I_Z \quad (1.2)$$

Proudovým výstupem obvodů je tedy svorka Z, čímž tedy pro CCII platí (**rovnice 1.3**):

- Výstupní impedance vstupu X – $Z_X = \text{nulová}$.
- Vstupní impedance vstupu Y – $Z_Y = \text{nekonečně velká}$.
- Výstupní impedance vývodu Z – $Z_Z = \text{nekonečně velká}$.

$$U_X = U_Y \quad (1.3)$$



Obrázek 1.4: *Principiální schéma obvodu proudového konvejeoru*

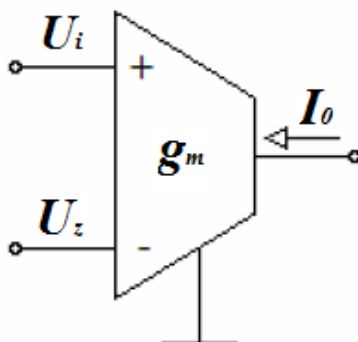
Jestli jsou splněny ideální podmínky, prakticky neexistuje zpětná vazba. To umožňuje velmi dobrou stabilitu obvodu u reaktivních řízení zátěží [5].

1.2 Transkonduktanční zesilovač

Transkonduktanční zesilovač (OTA), nebo také označován jako transadmitanční zesilovač, má jeden výstup a je charakterizován definicí zdroj proudu řízený napětím. Na trh ho uvedla společnost RCA v roce 1969. Transkonduktance g_m , neboli přenosová vodivost, je hlavní vlastnost tohoto prvku. Lze jej použít ve vyšších kmitočtových oblastech, kde se pracovní oblast pohybuje v řádech stovek kHz až jednotky MHz. Za pomoci stejnosměrného proudu I_0 může pracovat buď s konstantní, nebo s nastavitelnou přenosovou vodivostí, díky které lze realizovat oscilátory, filtry a násobiče [8]. Na vstupu obsahuje kapacitní charakter a na výstupu odporovou i kapacitní složku. Zesilovač přeměňuje vstupní diferenční napětí na výstupní proud, který je zpracován proudovými zrcadly na výstup. Další vlastností je, že zesilovače nepotřebují využít zpětnou vazbu, která je z hlediska stability výhodná, a mají konečné zesílení. Z těchto vlastností si lze odvodit rovnici (**rovnice 1.4**):

$$I_0 = g_m \cdot (U_i - U_z) \quad (1.4)$$

Kde I_0 je řídicí proud, U_i je napětí na invertujícím vstupu a U_z napětí na neinvertujícím vstupu. Napětí mají ideální nekonečnou impedanci na vstupu i výstupu, viz **obrázek 1.5** [8].



Obrázek 1.5: Schematická značka ideálního transkonduktančního zesilovače

V principiálním schématu na **obrázku 1.6** jsou uvedena čtyři proudová zrcadla s převodem proudů 1:1, která se skládají z prvků (D1, T4), (D2, T5), (D3, T3) a (D4, T6), a dvou tranzistorů T1 a T2. Z toho vyplývá, že protékající kolektorové proudy na tranzistorech (T5, T2) a (T1, T6) jsou vzájemně stejné [5].

Zde musí tedy platit pro proudy podmínka (**rovnice 1.5**):

$$I_0 = I_2 - I_1 \quad (1.5)$$

Po zanedbání proudů se získá diferenční napětí U_d (rovnice 1.7):

$$U_d = U_{BE2} - U_{BE1} \quad (1.6)$$

$$U_d = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln(I_2/I_1) = U_T \cdot \ln(I_2/I_1) \quad (1.7)$$

Kvůli malým hodnotám vstupního napětí U_i je lepší rovnici 1.5 upravit, protože proudy I_1 a I_2 mají pouze nepatrné odchylky (rovnice 1.9) [5]:

$$U_d = U_T \cdot \ln \frac{I_2 + I_1 - I_1}{I_1} = U_T \cdot \ln(1 + \frac{I_2 - I_1}{I_1}) \quad (1.8)$$

$$U_d \doteq U_T \cdot \frac{I_2 - I_1}{I_1} = U_T \cdot \frac{I_0}{I_1} \quad (1.9)$$

Z předchozích vztahů tedy plyne, že vždy platí (rovnice 1.10):

$$I_B = I_1 + I_2 \quad (1.10)$$

Kvůli nepatrným odchylkám je zde možné použít vztah (rovnice 1.11):

$$I_B \doteq 2I_1 \quad (1.11)$$

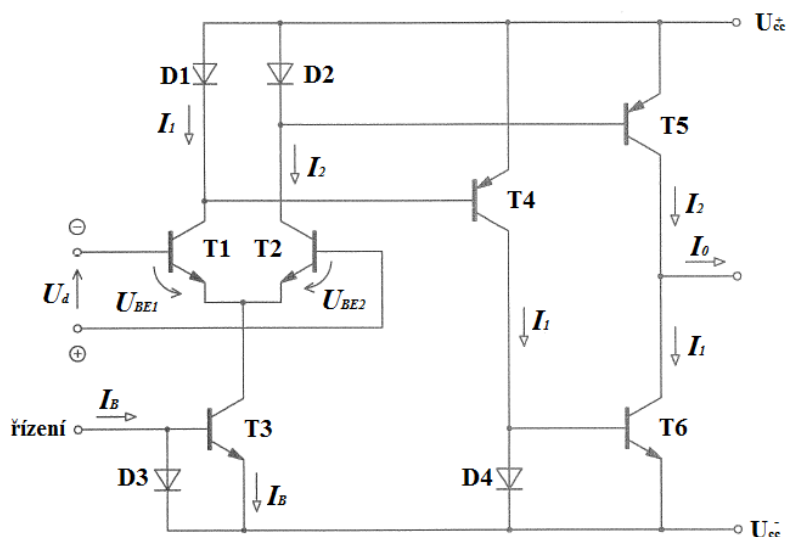
Po dosazení do rovnice 1.7 lze dosáhnout malé hodnoty vstupního napětí U_i , kde proudy I_1 a I_2 mají nepatrné odchylky (rovnice 1.12):

$$I_0 = U_d \cdot I_B / (2U_T) \quad (1.12)$$

Z rovnice 1.10 se získá transkonduktance g_m (rovnice 1.13):

$$g_m = I_B / (2U_T) \quad (1.13)$$

Hodnota transkonduktance g_m se dá řídit změnou hodnoty proudu I_B ($U_T = 26\text{mV}$ při $T = 300\text{KHz}$)



Obrázek 1.6: Principiální zapojení transkonduktančního zesilovače OTA

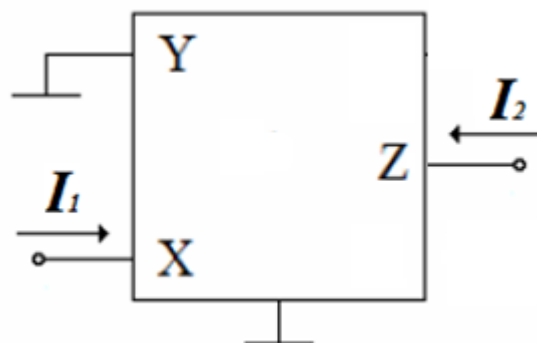
1.3 Proudové zrcadlo

V angličtině jako Current Mirror and Inverter, tedy proudové zrcadlo, lze popsat jako zdroj proudu řízený proudem. Je to nový aktivní prvek, který se často používá v integrovaných analogových a číslicových obvodech. Jak z názvu vyplývá, jejich hlavní činností je zrcadlit referenční proud tekoucí v jedné větvi do jeho druhé větve. Tyto prvky se často využívají jako proudové opakovače, nebo zdroje konstantního proudu. Jsou odolnější proti vzniku šumu při nízkých napájecích napětích, a také zvětšují kmitočtovou oblast zpracovávaného signálu. Rozlišují se dva typy zrcadel, a to ideální a reálné [9]. Hlavní rozdíl mezi ideálním a reálným zrcadlem je v hodnotě výstupního a vstupního odporu. U ideálního proudového zrcadla je nekonečně malý vstupní odpor, který zajišťuje, aby nedošlo k ovlivnění protékajícího proudu vstupem zrcadla. Rozdíl u reálného zrcadla oproti proudovému zrcadlu je, že vstupní odpor je poměrně vysoký a jeho snížení se provádí modifikací jednotlivých zapojení. Jako další velký rozdíl reálného a ideálního zrcadla je směr proudu, kde u ideálního se proud zrcadlí na výstup v obou směrech, přitom se ve skutečnosti proud zrcadlí v závislosti na typech použitých tranzistorů. Proudové zdroje se dají využít u zatěžovacího rezistoru zesilovače jako aktivní zátěže díky velkému výstupnímu odporu zdroje, a také kvůli jeho lepším vlastnostem se dají použít namísto vysokoohmových rezistorů. Jeho zesílení může být pouze kladné. Je tak dovoleno lepší osazení čipu, protože nevyžaduje takovou plochu ve funkčním bloku, a je umožněno snadného připojení dalších obvodů. Považuje se za čistě proudový, protože vstupní i výstupní svorky jsou proudové, a vstupní i výstupní veličiny také, s čímž je i spojen model ideálního proudového konveju, který je zobrazen na **obrázku 1.7** [10].



Obrázek 1.7: Model ideálního proudového zrcadla

S proudovými zrcadly se lze tedy setkat ve vnitřních strukturách operačních zesilovačů a v několika generacích proudových konveju, jako jsou např. invertující konveju, proudové konveju, zesilovače s proudovou zpětnou vazbou (CFA), transadmitanční zesilovače (OTA), nebo konveju s rozdílovým a součtovým výstupem.

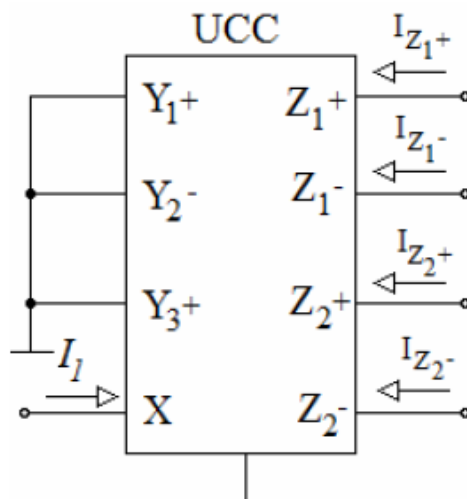


Obrázek 1.8: *Proudové zrcadlo realizováno pomocí proudového konvejeoru*

K realizaci proudového zrcadla stačí uzemnit napětovou svorku Y. Dá se tak realizovat všemi generacemi proudových konvejeorů, viz **obrázek 1.8**. Kdyby se rozšířil počet výstupních bran, vznikl by tak prvek MCMI, viz **obrázek 1.9**, který lze realizovat stejným způsobem, tedy uzemníme svorky Y_{1+} , Y_{2-} a Y_{3+} v zapojení s univerzálním konvejeorem [10]. Proudů jsou tak vyjádřeny rovnicemi (**rovnice 1.14**):

$$I_2 = I_1, I_3 = -I_1 \quad (1.14)$$

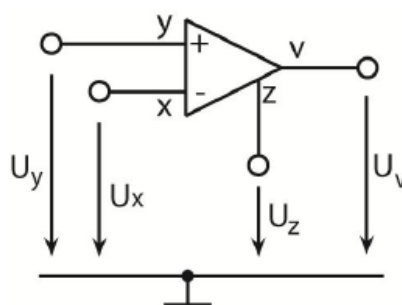
Realizace proudového zrcadla MCMI by tedy vypadala následovně:



Obrázek 1.9: *MCMI realizace pomocí univerzálního proudového konvejeoru*

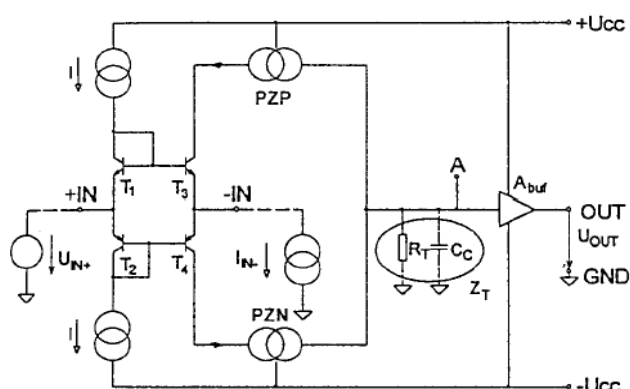
1.4 Transimpedanční zesilovač TIA

Transimpedanční zesilovač je jeden z mnoha analogových perspektivních moderních aktivních prvků. TIA je také označován jako operační zesilovač se zpětnou proudovou vazbou CFOA (Current Feedback Operational Amplifier), viz **obrázek 1.10**. Velká výhoda tohoto obvodu je možnost práce ve smíšeném, proudovém i napětovém režimu. Má velkou použitelnost v obvodech širokopásmových analogových systémů, a je vyráběna jako diskretní součástka firmou Analog Devices nesoucí označení AD844.



Obrázek 1.10: Schematická značka transimpedančního zesilovače

Vstupní konvektor CCII má velký vliv na vlastnosti transimpedančního zesilovače. Transformace napětí a proudu se hodně uplatňuje v oblasti realizace mutátorových memristivních systémů, kde se TIA stal ideálním prvkem pro využití. Memristor je součástí s vnější podobou rezistoru. Jeho emulátor potřebuje napájení jako každý jiný analogový aktivní obvod. Z toho důvodu je potřeba zakomponovat do pouzdra emulátoru baterii, nebo akumulátor. TIA AD844 tedy nedokázal komerčně plnit důležité požadavky, jelikož měl velké problémy v oblasti proudového odběru a vykonávané spotřebě obvodu, nebo nemožnosti pracovat v režimu rail – to rail, kde na **obrázku 1.11** lze vidět jeho obvodové řešení [8].

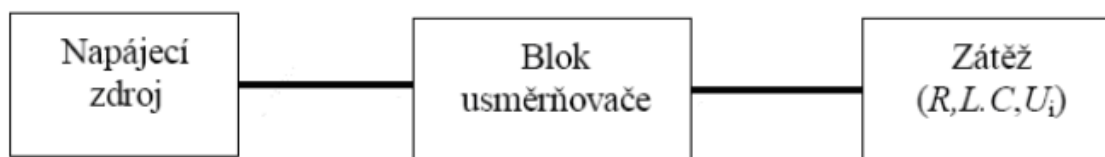


Obrázek 1.11: Obvodové řešení TIA

2 Operační usměrňovače

2.1 Operační usměrňovače obecně

Operační usměrňovač je vlastně polovodičový měnič používaný k přeměně stejnosměrného proudu na střídavý. Je tvořen třemi základními bloky, tj. napájecí zdroj, blok usměrňovače a zátěž. Zdroj může být buď střídavá fázová napájecí síť, nebo transformátor. Ve vlastním bloku usměrňovače lze najít polovodičové výkonné součástky. V zátěži pak kombinace prvků s R, L, C, nebo protinapětím U_i , viz **obrázek 2.1** [12].



Obrázek 2.1: *Blokové schéma usměrňovače*

Usměrňovače se dále rozdělují podle dalších kritérií, jako jsou např. počty pulsů, druhu napájecího zdroje a počtu fází, charakteristiky výstupních stejnosměrných veličin, a dále podle zapojení z hlediska výstupního proudu, nebo zapojení jednotlivých polovodičových prvků a zdroje [12].

Rozdělení podle počtu pulsů:

- Jednopulsní
- Dvoupulsní
- Trojpulsní
- Šestipulsní
- Vícepulsní

Rozdělení podle druhu napájecího zdroje a počtu fází:

- Jednofázové ($m = 1$)
- Trojfázové ($m = 3$)
- M-fázové

Rozdělení podle charakteristiky výstupních stejnosměrných veličin:

- Řízené (jsou to zapojené obvody říditelné pomocí polovodičových prvků, jako jsou např. tranzistor nebo tyristor). Dále je možné je dělit podle směru toku energie (způsobu provozu):

-
- Jednokvadrantové (energie se přenáší jen ze zdroje do zátěže).
 - Dvoukvadrantové (energie se přenáší jakkoliv mezi zdrojem a zátěží).
- Neřízené (jsou to zapojené obvody neříditelné pomocí polovodičových prvků, např. dioda).

Rozdělení zapojení z hlediska výstupního proudu:

- Jednocestné (na vstupu je proud jednosměrný).
- Dvoucestné (na vstupu je proud obousměrný).

Rozdělení zapojení jednotlivých polovodičových prvků a zdroje:

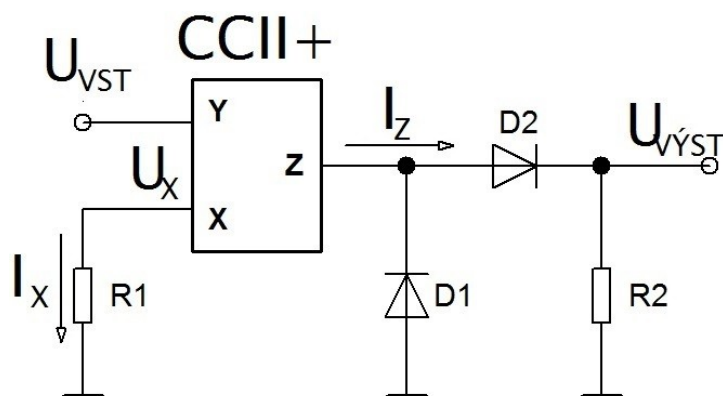
- Místkové (vstupní jsou středy skupiny a výstupní jsou společné vnější svorky o stejné polaritě).
- Uzlové (všechny napěťové zdroje a polovodičové součástky jsou spojeny jedním pólem do jednoho uzlu).

Usměrněný proud je označován I_d , což je okamžitá hodnota. Průběh proudu I_d je dán průběhem zátěže a usměrněného napětí U_d . Zátěž může obsahovat indukčnost L , kapacitu C , odpor R a popřípadě protinapětí. Takový usměrněný proud je zvlněný, ale pokud nedosáhne nulové hodnoty v průběhu periody napětí výstupního, bude se takový proud nazývat spojitý [13].

2.2 Jednocestný usměřňovač

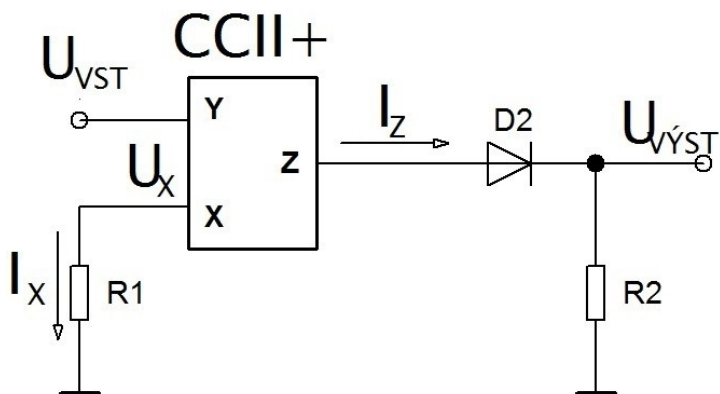
2.2.1 Jednocestný usměřňovač pro kladné vstupní napětí

Pokud se přivede na svorku Y vstupní napětí $U_{VST} > 0$, stejné napětí bude i na svorce X , tedy napětí U_X bude rovno napětí U_{VST} . Proud I_X vytékající ze svorky X bude roven proudu I_Z na svorce Z . Dioda $D1$ pracuje v závěrném směru, nepropouští tedy žádný proud. $D2$ je zapojena v propustném směru, proud I_Z propustí, který vytvoří na rezistoru R_2 úbytek napětí U_{VYST} , viz **obrázek 2.2** [14].



Obrázek 2.2: Jednocestný usměrňovač pro kladné vstupní napětí

Pro lepší orientaci se lze řídit schématem na **obrázku 2.3**, které bylo modifikováno o diodu, která byla zapojena v závěrném směru, tudíž nepropouštěla proud, a byla ponechána dioda, která je zapojena v propustném směru a proud propouští.



Obrázek 2.3: Výpočtové schéma

Ze schématu lze tedy odvodit, že napětí na svorkách Y a X si jsou rovna (**rovnice 2.1**):

$$U_{VST} = U_X \quad (2.1)$$

A proudy vytékající na svorkách X a Z také (**rovnice 2.3**):

$$I_X = \frac{U_X}{R_1} = \frac{U_{VST}}{R_1} \quad (2.2)$$

$$I_X = I_Z \quad (2.3)$$

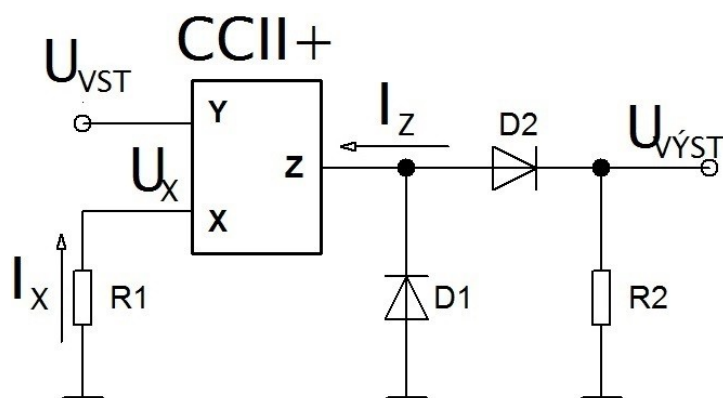
Napětí na výstupu U_{VYST} lze tedy vypočítat ze vztahu (**rovnice 2.5**):

$$U_{VYST} = R_2 \cdot I_Z = R_2 \cdot \frac{U_{VST}}{R_1} \quad (2.4)$$

$$U_{VYST} = \frac{R_2}{R_1} \cdot U_{VST} \quad (2.5)$$

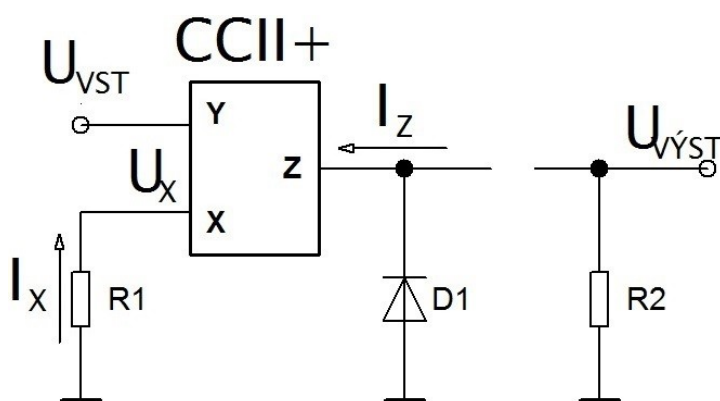
2.2.2 Jednocestný usměrňovač pro záporné vstupní napětí

Pokud se přivede na svorku Y vstupní napětí $U_{VST} < 0$, stejné napětí bude i na svorce X, tedy napětí U_X bude rovno napětí U_{VST} . Proud I_X vtékající do svorky X bude roven proudu I_Z na svorce Z. Dioda D2 pracuje v závěrném směru, nepropouští tedy žádný proud. D1 je zapojena v propustném směru, proud I_Z propustí, ale jelikož je uzemněna, proud se dál nedostane a úbytek napětí na odporu R_2 bude nulový, viz **obrázek 2.4** [14].



Obrázek 2.4: Jednocestný usměrňovač pro záporné vstupní napětí

Pro lepší orientaci se lze řídit schématem na **obrázku 2.5**, které bylo modifikováno o diodu, která byla zapojena v závěrném směru, tudíž nepropouštěla proud, a byla ponechána dioda, která je zapojena v propustném směru a proud propouští.



Obrázek 2.5: Výpočtové schéma

Ze schématu lze tedy odvodit, že napětí na svorkách Y a X si jsou rovna (**rovnice 2.6**):

$$-U_{VST} = U_X \quad (2.6)$$

A proudy vtékající na svorkách X a Z také (**rovnice 2.8**):

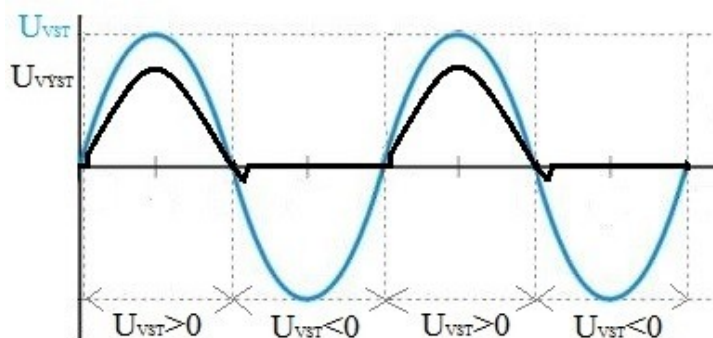
$$-I_X = \frac{U_X}{R_1} = \frac{-U_{VST}}{R_1} \quad (2.7)$$

$$-I_X = I_Z \quad (2.8)$$

Napětí na výstupu U_{VYST} tedy bude rovno 0 (**rovnice 2.9**):

$$U_{VYST} = 0 \quad (2.9)$$

Výsledný graf na **obrázku 2.6** ukazuje jednotlivá napětí za předpokladu platnosti podmínek z předchozích schémat, že pro vstupní napětí $U_{VST} > 0$ bude výstupní napětí U_{VYST} v kladných hodnotách a pro vstupní napětí $U_{VST} < 0$ bude výstupní napětí U_{VYST} nulové.

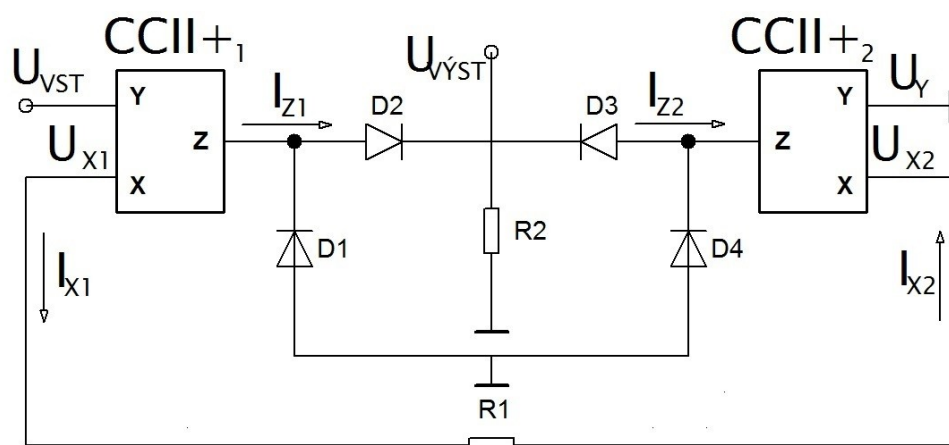


Obrázek 2.6: Porovnání vstupního napětí pro kladnou a zápornou hodnotu

2.3 Dvoucestný usměrňovač

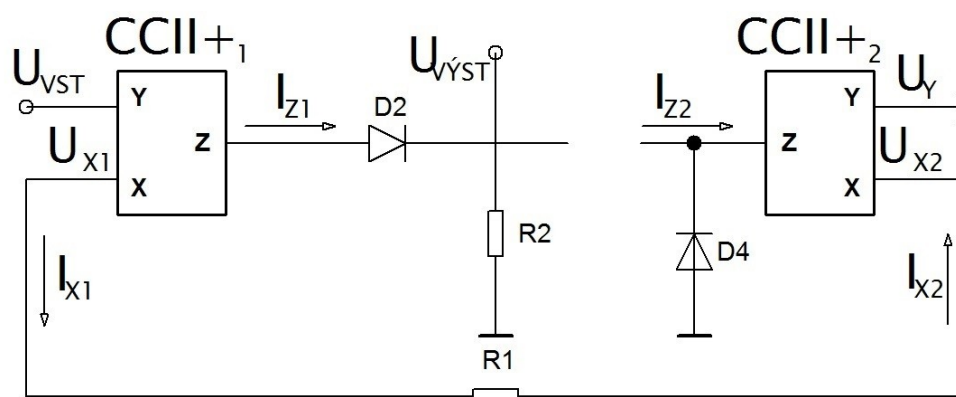
2.3.1 Dvoucestný usměrňovač pro kladné vstupní napětí

Pokud se přivede na svorku Y vstupní napětí $U_{VST} > 0$, stejné napětí bude i na svorce X, tedy napětí U_{X1} bude rovno napětí U_{VST} . Proud I_{X1} vytékající ze svorky X bude roven proudu I_{Z1} na svorce Z. Napětí U_Y je uzemněno, tudíž napětí U_{X2} bude rovno 0. Proud I_{Z2} vtékající do svorky Z bude roven proudu I_{X2} na svorce X a zároveň proud I_{X2} bude roven proudu I_{X1} . Diody D1 a D3 pracují v závěrném směru, nepropouští tedy žádný proud, a diody D2 a D4 jsou zapojeny v propustném směru. D2 tedy proud I_{Z1} propustí a ten vytvoří na rezistoru R_2 úbytek napětí U_{VYST} , viz **obrázek 2.7** [14].



Obrázek 2.7: Dvoucestný usměrňovač pro kladné vstupní napětí

Pro lepší orientaci se lze řídit schématem na **obrázku 2.8**, které bylo modifikováno o diody, které byly zapojeny v závěrném směru, tudíž nepropouštěly proud, a byly ponechány diody, které jsou zapojené v propustném směru a proud propouští.



Obrázek 2.8: Výpočtové schéma

Ze schématu lze tedy odvodit, že napětí na svorkách Y a X si jsou rovna (**rovnice 2.10**):

$$U_{VST} = U_{X1}, U_Y = U_{X2} = 0 \quad (2.10)$$

A proudy vtékající, nebo vytékající ze svorek X a Z také (**rovnice 2.12 a rovnice 2.13**):

$$I_{X1} = \frac{U_{X1}}{R_1} = \frac{U_{VST}}{R_1} \quad (2.11)$$

$$I_{X1} = I_{Z1} \quad (2.12)$$

$$I_{X1} = I_{X2} = I_{Z2} \quad (2.13)$$

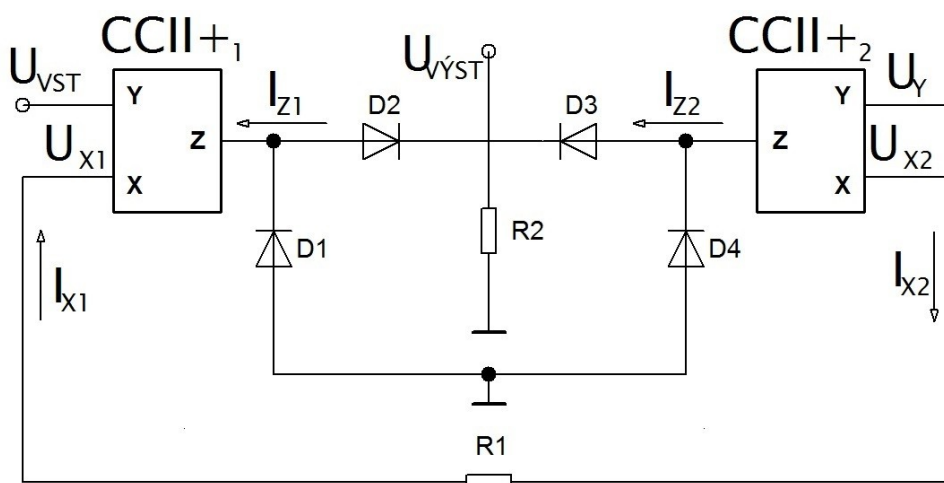
Napětí na výstupu $U_{V\check{Y}ST}$ lze tedy vypočítat ze vztahu (rovnice 2.15):

$$U_{V\check{Y}ST} = R_2 \cdot I_{Z1} = R_2 \cdot \frac{U_{VST}}{R_1} \quad (2.14)$$

$$U_{V\check{Y}ST} = \frac{R_2}{R_1} \cdot U_{VST} \quad (2.15)$$

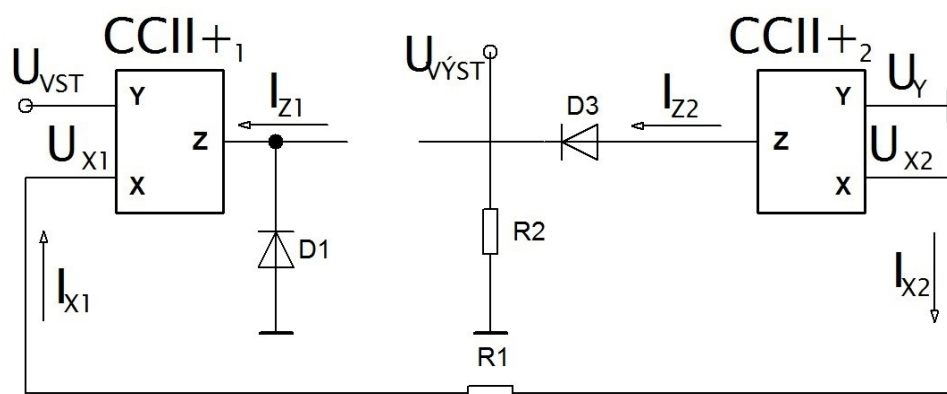
2.3.2 Dvoucestný usměrňovač pro záporné vstupní napětí

Pokud se přivede na svorku Y vstupní napětí $U_{VST} < 0$, stejné napětí bude i na svorce X, tedy napětí U_{X1} bude rovno napětí U_{VST} . Proud I_{X1} vtékající do svorky X bude roven proudu I_{Z1} na svorce Z. Napětí U_Y je uzemněno, tudíž napětí U_{X2} bude rovno 0. Proud I_{Z2} vytékající ze svorky Z bude roven proudu I_{X2} na svorce X, a zároveň proud I_{X2} bude roven proudu I_{Z1} . Diody D2 a D4 pracují v závěrném směru, nepropouští tedy žádný proud, a diody D1 a D3 jsou zapojeny v propustném směru. D3 tedy proud I_{Z2} propustí, a ten vytvoří na rezistoru R_2 úbytek napětí $U_{V\check{Y}ST}$, viz **obrázek 2.9** [14].



Obrázek 2.9: Dvoucestný usměrňovač pro záporné vstupní napětí

Pro lepší orientaci se lze řídit schématem na **obrázku 2.10**, které bylo modifikováno o diody, které byly zapojeny v závěrném směru, tudíž nepropouštěly proud, a byly ponechány diody, které jsou zapojené v propustném směru a proud propouští.



Obrázek 2.10: Výpočtové schéma

Ze schématu lze tedy odvodit, že napětí na svorkách Y a X si jsou rovna (**rovnice 2.16**):

$$-U_{VST} = U_{X1}, U_Y = U_{X2} = 0 \quad (2.16)$$

A proudy vtékající, nebo vytékající ze svorek X a Z také (**rovnice 2.18**):

$$-I_{X1} = \frac{U_{X1}}{R_1} = \frac{-U_{VST}}{R_1} \quad (2.17)$$

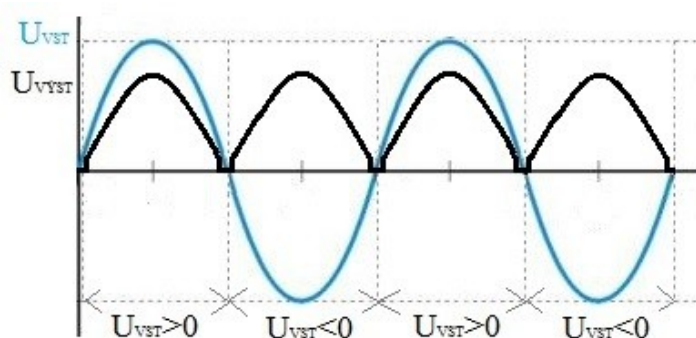
$$-I_{X1} = I_{X2} = I_{Z2} \quad (2.18)$$

Napětí na výstupu U_{VYST} lze tedy vypočítat ze vztahu (**rovnice 2.20**):

$$U_{VYST} = R_2 \cdot (-I_{Z2}) = R_2 \cdot \frac{-U_{VST}}{R_1} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot (-U_{VST}) \quad (2.19)$$

$$U_{VYST} = \frac{R_2}{R_1} \cdot U_{VST} \quad (2.20)$$

Výsledný graf na **obrázku 2.11** ukazuje jednotlivá napětí za předpokladu platnosti podmínek z předchozích schémat, že pro napětí $U_{VST} > 0$ bude výstupní napětí U_{VYST} v kladných hodnotách, a pro vstupní napětí $U_{VST} < 0$ bude výstupní napětí U_{VYST} také v kladných hodnotách.

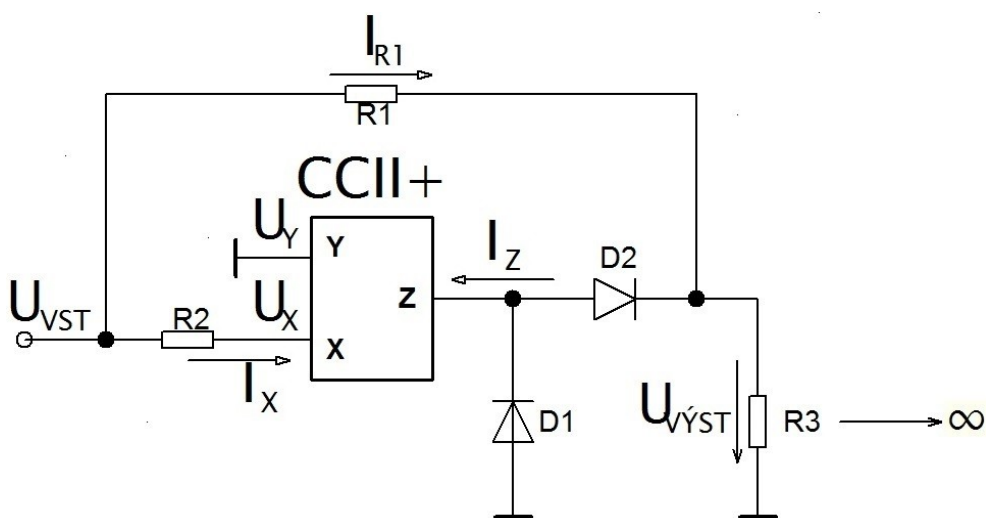


Obrázek 2.11: Porovnání vstupního napětí pro kladnou a zápornou hodnotu

2.4 Operační usměrňovač s proudovým sledovačem

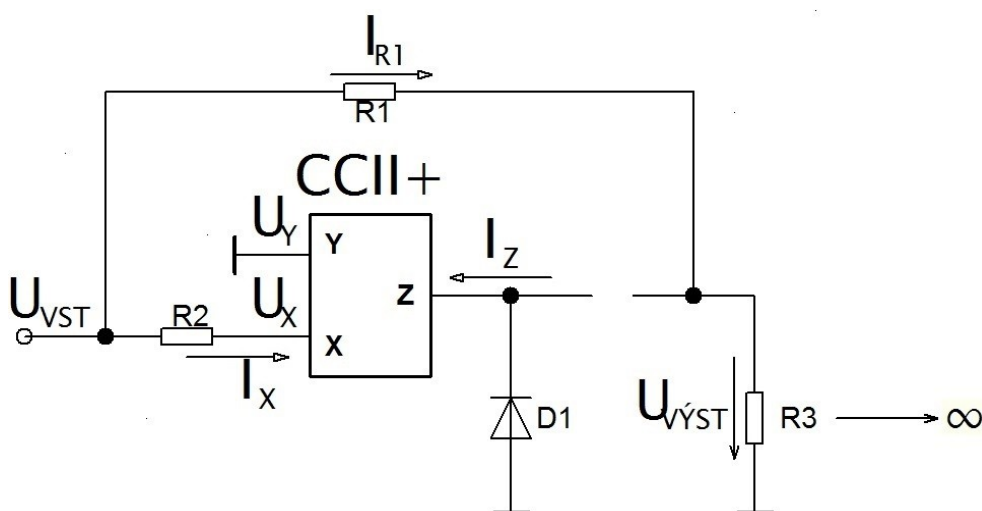
2.4.1 Operační usměrňovač s proudovým sledovačem pro kladné vstupní napětí

Do obvodu se přivede na svorku U_{VST} napětí $U_{VST} > 0$. Napětí na svorce Y bude i na svorce X, tedy napětí U_Y bude rovno napětí U_X . Napětí U_Y je uzemněno, takže napětí U_X bude rovno 0. Proud I_X vtékající do svorky X bude roven proudu I_Z na svorce Z. Dioda D2 pracuje v závěrném směru, nepropouští tedy žádný proud. D1 je zapojena v propustném směru, proud I_Z propustí, ale jelikož je uzemněna, proud se dál nedostane. Obvod se bude chovat jako odporový dělič, kde výstupní napětí U_{VYST} bude na zátěži R_3 s odporem blížícím se nekonečnu, viz **obrázek 2.12** [14].



Obrázek 2.12: Proudový sledovač pro kladné vstupní napětí

Pro lepší orientaci se lze řídit schématem na **obrázku 2.13**, které bylo modifikováno o diodu, která byla zapojena v závěrném směru, tudíž nepropouštěla proud, a byla ponechána dioda, která je zapojena v propustném směru a proud propouští.



Obrázek 2.13: Výpočtové schéma

Ze schématu lze tedy odvodit, že napětí na svorkách Y a X si jsou rovna (**rovnice 2.21**):

$$U_Y = U_X = 0 \quad (2.21)$$

A proudy vtékající na svorkách X a Z také (**rovnice 2.23**):

$$I_X = \frac{U_{VST}}{R_2} \quad (2.22)$$

$$I_X = I_Z \quad (2.23)$$

Napětí na výstupu U_{VYST} lze tedy vypočítat ze vztahu (**rovnice 2.24**):

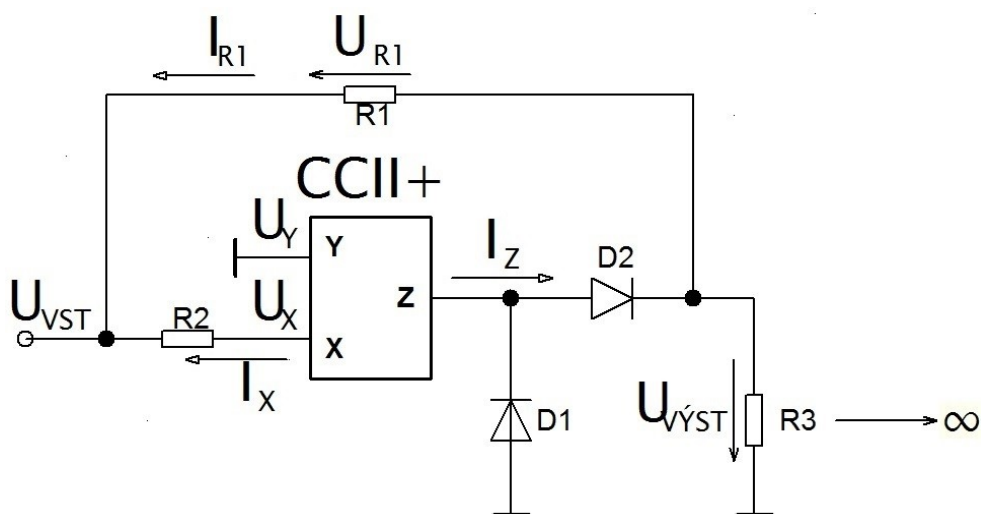
$$U_{VYST} = \frac{R_3}{R_1 + R_3} \cdot U_{VST} \quad (2.24)$$

Pokud by byl odpor $R_3 \gg R_1$, pak se dá uvažovat, že napětí U_{VYST} a U_{VST} si budou téměř rovna (**rovnice 2.25**):

$$U_{VYST} \approx U_{VST} \quad (2.25)$$

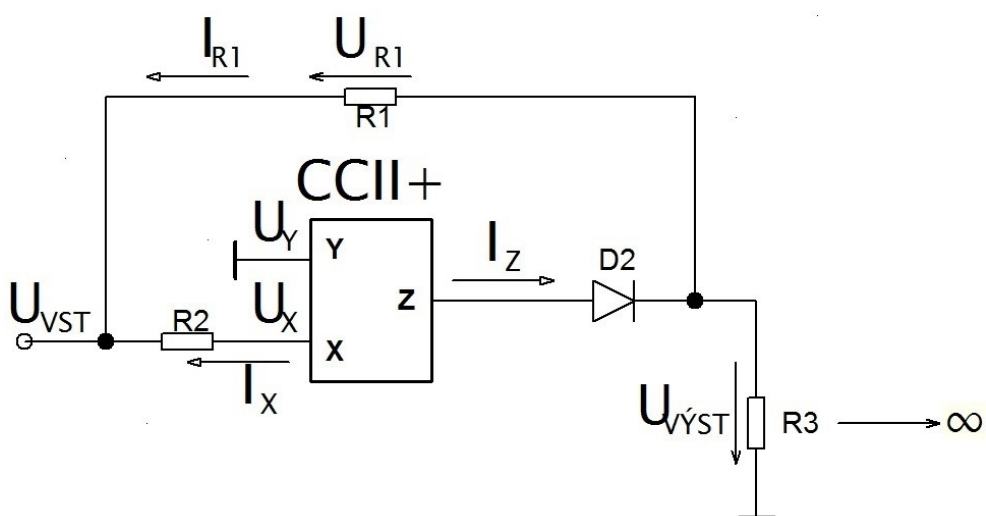
2.4.2 Ope rační usmě řňovač s proudovým sledovačem pro záporné vstupní napětí

Do obvodu se přivede na svorku U_{VST} napětí $U_{VST} < 0$. Napětí na svorce Y bude i na svorce X, tedy napětí U_Y bude rovno napětí U_X . Napětí U_Y je uzemněno, takže napětí U_X bude rovno 0. Proud I_X vytékající ze svorky X bude roven proudu I_Z na svorce Z. Dioda D1 pracuje v závěrném směru, nepropouští tedy žádný proud. D2 je zapojena v propustném směru, kde proud I_Z vytvoří na rezistoru R_1 úbytek napětí U_{R1} . Výstupní napětí U_{VYST} pak bude na zátěži R_3 s odporem blížíci se nekonečnu rovno 0, viz **obrázek 2.14** [14].



Obrázek 2.14: Proudový sledovač pro záporné vstupní napětí

Pro lepší orientaci se lze řídit schématem na **obrázku 2.15**, které bylo modifikováno o diodu, která byla zapojena v závěrném směru, tudíž nepropouštěla proud, a byla ponechána dioda, která je zapojena v propustném směru a proud propouští.



Obrázek 2.15: Výpočtové schéma

Ze schématu lze tedy odvodit, že napětí na svorkách Y a X si jsou rovna (**rovnice 2.26**):

$$U_Y = U_X = 0 \quad (2.26)$$

A proudy vytékající na svorkách X a Z také (**rovnice 2.28**):

$$I_X = \frac{U_{VST}}{R_2} = \frac{U_X}{R_2} \quad (2.27)$$

$$I_X = I_Z = I_{R1} \quad (2.28)$$

Po odvození vztahu pro úbytek napětí U_{R1} (**rovnice 2.29**):

$$U_{R1} = U_{VST} = R_1 \cdot I_Z = R_1 \cdot \frac{U_{VST}}{R_2} \quad (2.29)$$

Lze odvodit podmínku pro U_{VYST} , protože vstupní napětí U_{VST} je rovno úbytku napětí U_{R1} na rezistoru R_1 (**rovnice 2.32**):

$$U_{VST} = U_{VST} \cdot \frac{R_1}{R_2} \quad (2.30)$$

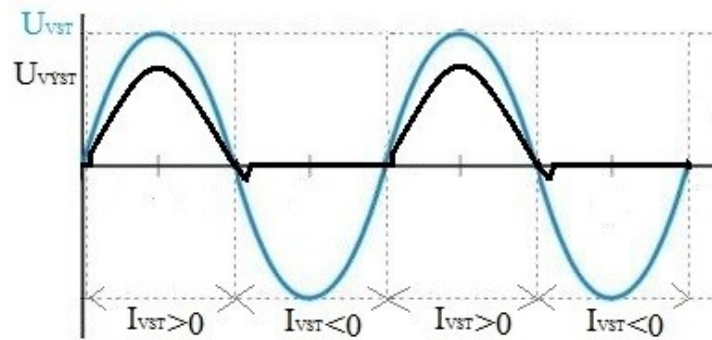
$$\frac{R_1}{R_2} = 1 \quad (2.31)$$

$$R_1 = R_2 \quad (2.32)$$

Pokud bude tedy platit podmínka, potenciální napětí na výstupu U_{VYST} bude rovno 0 (**rovnice 2.33**):

$$U_{VYST} = 0 \quad (2.33)$$

Výsledný graf na **obrázku 2.16** ukazuje jednotlivá napětí, za předpokladu platnosti podmínek z předchozích schémat, že pro vstupní napětí $U_{VST} > 0$ bude výstupní napětí U_{VYST} v kladných hodnotách a pro vstupní napětí $U_{VST} < 0$ bude výstupní napětí U_{VYST} nulové.

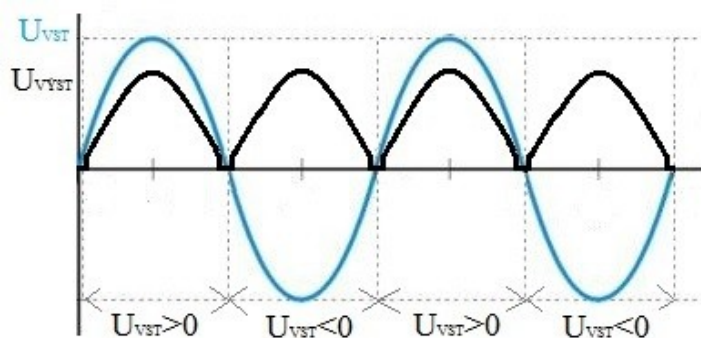


Obrázek 2.16: Porovnání vstupního napětí pro kladnou a zápornou hodnotu

Porovnání vstupního napětí U_{VST} na **obrázku 2.16** je v případě jednocestného operačního usměrňovače s proudovým sledovačem. V případě dvoucestného operačního usměrňovače s proudovým sledovačem by musela platit pro odpory podmínka (**rovnice 2.34**):

$$R_1 = 2 \cdot R_2 \quad (2.34)$$

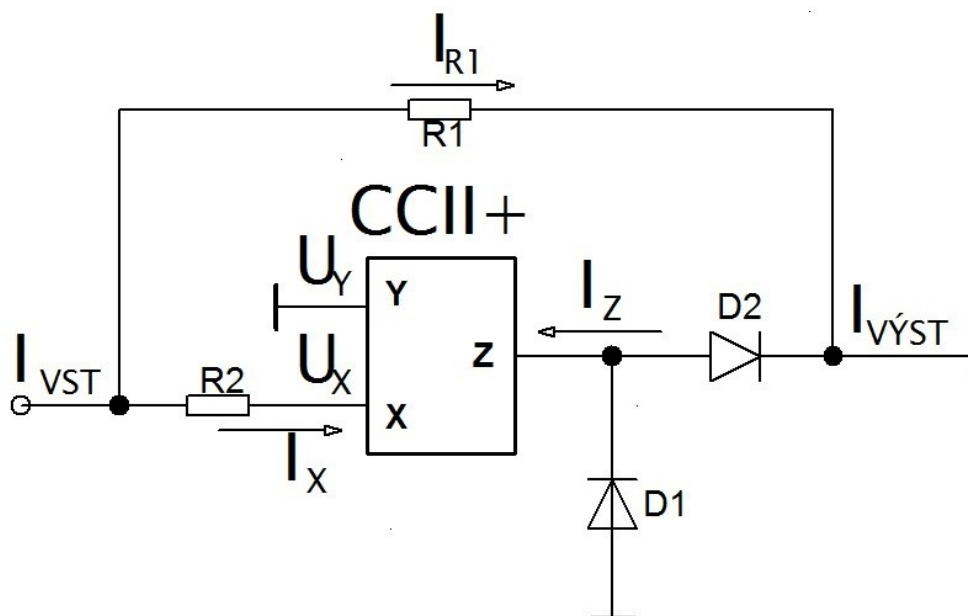
A výsledné porovnání napětí by tedy vypadalo následovně, viz **obrázek 2.17**.



Obrázek 2.17: Porovnání vstupního napětí pro kladnou a zápornou hodnotu

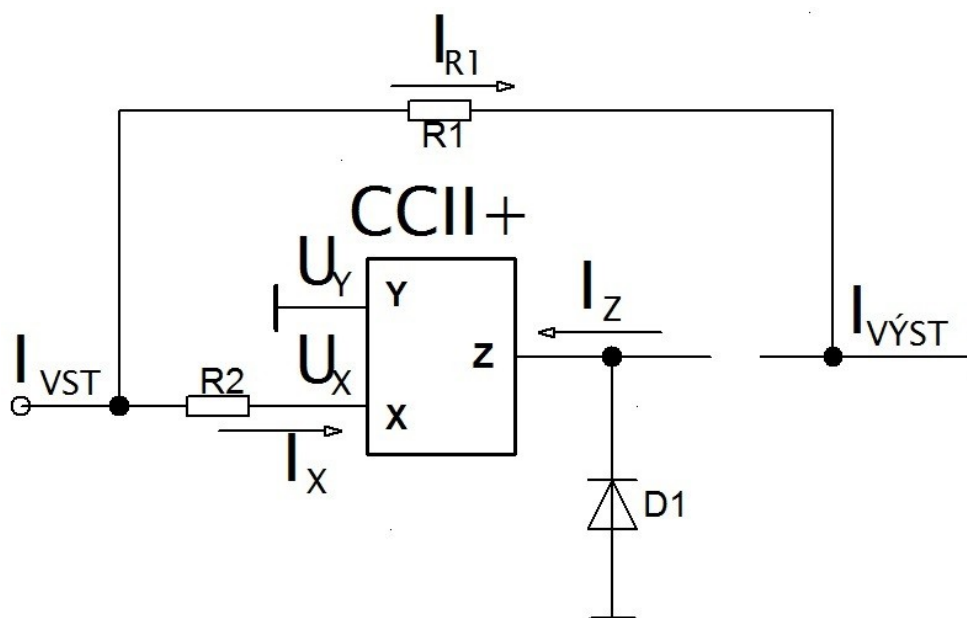
2.4.3 Operační usměrňovač s proudovým sledovačem pro kladný vstupní proud

Do obvodu přivádíme na svorku I_{VST} proud $I_{VST} > 0$. Napětí na svorce Y bude stejné jako napětí na svorce X, tedy napětí U_Y bude rovno napětí U_X . Napětí U_Y je uzemněno, takže napětí U_X bude rovno 0. Proud I_X vtékající do svorky X bude roven proudu I_Z na svorce Z. Dioda D2 pracuje v závěrném směru, nepropustí tedy žádný proud. D1 je zapojena v propustném směru, proud I_Z propustí, ale jelikož je uzemněna, proud se dál nedostane. Proud I_{R1} tekoucí přes rezistor R_1 teče na výstupní svorku I_{VYST} , která je uzemněna. Proud I_{R1} bude tedy roven výstupnímu proud I_{VYST} , viz **obrázek 2.18** [14].



Obrázek 2.18: Operační usměrňovač s proudovým sledovačem pro kladný vstupní proud

Pro lepší orientaci se lze řídit schématem na **obrázku 2.19**, které bylo modifikováno o diodu, která byla zapojena v závěrném směru, tudíž nepropouštěla proud, a byla ponechána dioda, která je zapojena v propustném směru a proud propouští.



Obrázek 2.19: Výpočtové schéma

Ze schématu lze tedy odvodit, že napětí na svorkách Y a X si jsou rovna (**rovnice 2.35**):

$$U_Y = U_X = 0 \quad (2.35)$$

A proudy vtékající na svorkách X a Z také (**rovnice 2.37**):

$$I_X = I_Z = I_{VST} \quad (2.36)$$

$$I_{R1} = I_{VYST} \quad (2.37)$$

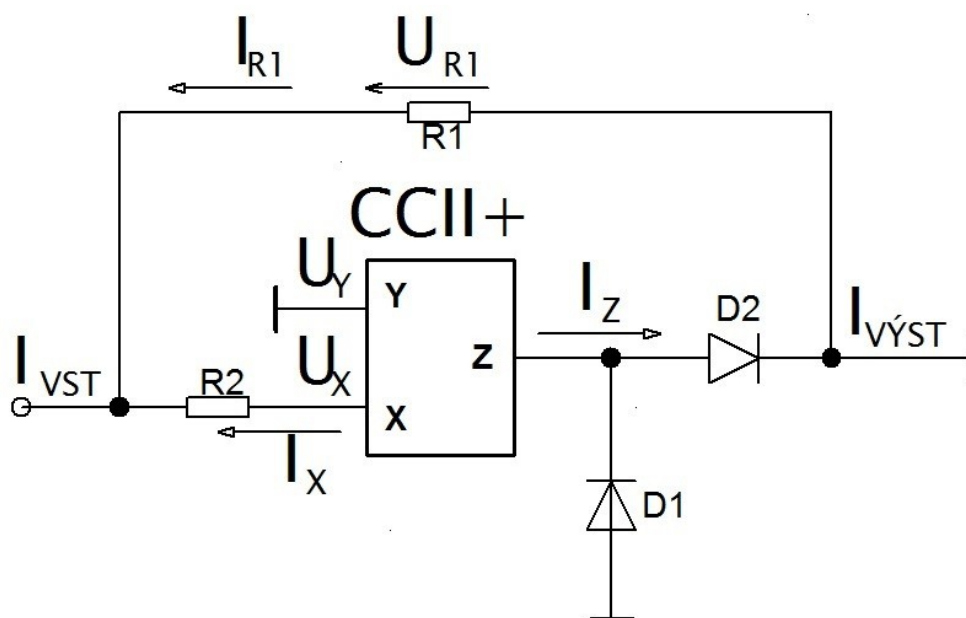
Vytékající proud I_{VYST} lze tedy vyjádřit (**rovnice 2.38**):

$$I_{VYST} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot I_{VST} \quad (2.38)$$

2.4.4 Operační usměrňovač s proudovým sledovačem pro záporný vstupní proud

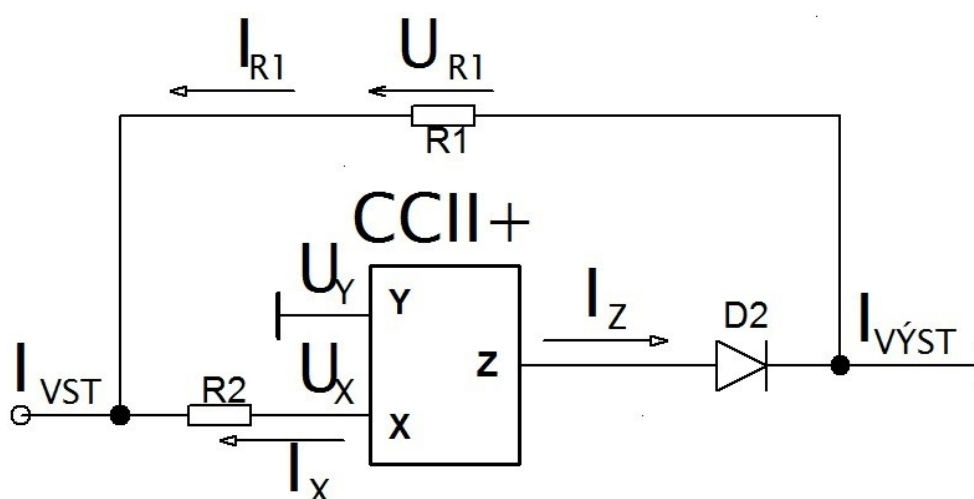
Do obvodu přivádíme na svorku I_{VST} proud $I_{VST} < 0$. Napětí na svorce Y bude stejné jako napětí na svorce X, tedy napětí U_Y bude rovno napětí U_X . Napětí U_Y je uzemněno, takže napětí U_X bude rovno 0. Proud I_X vytékající ze svorky X bude roven proudu I_Z na svorce Z. Dioda D1 pracuje v závěrném směru, nepropouští tedy žádný proud. D2 je zapojena

v propustném směru a proud I_Z propustí. Výstupní proud I_{VYST} bude tedy roven 0, za předpokladu, že rezistory R_1 a R_2 si budou rovny, viz **obrázek 2.20** [14].



Obrázek 2.20: Operační usměrňovač s proudovým sledovačem pro záporný vstupní proud

Pro lepší orientaci se lze řídit schématem na **obrázku 2.21**, které bylo modifikováno o diodu, která byla zapojena v závěrném směru, tudíž nepropouštěla proud, a byla ponechána dioda, která je zapojena v propustném směru a proud propouští.



Obrázek 2.21: Výpočtové schéma

Ze schématu lze tedy odvodit, že napětí na svorkách Y a X si jsou rovna (**rovnice 2.39**):

$$U_Y = U_X = 0 \quad (2.39)$$

A proudy vytékající na svorkách X a Z také (**rovnice 2.41**):

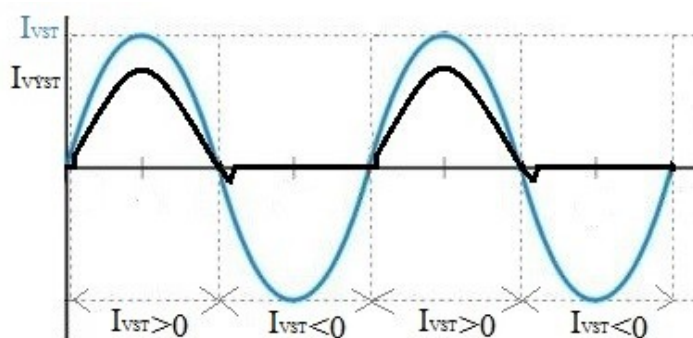
$$I_X = I_Z = I_{R1} \quad (2.40)$$

$$I_Z = I_{R1} + I_{VYST} \quad (2.41)$$

Za předpokladu, že rezistory R_1 a R_2 si jsou rovny, výstupní proud I_{VYST} bude roven 0 (**rovnice 2.42**):

$$I_{VYST} = 0 \quad (2.42)$$

Výsledný graf na **obrázku 2.22** ukazuje jednotlivé proudy, za předpokladu platnosti podmínek z předchozích schémat, že pro vstupní proud $I_{VST} > 0$ bude výstupní proud I_{VYST} v kladných hodnotách, a pro vstupní proud $I_{VST} < 0$ bude výstupní proud I_{VYST} nulový.



Obrázek 2.22: Porovnání vstupního proudu pro kladnou a zápornou hodnotu

V **tabulce 2.1** lze vidět jednotlivé možnosti využití operačního usměrňovače. Za předpokladu, že budou dodrženy odporové podmínky, lze operační usměrňovač donutit pracovat jako jednocestný nebo dvoucestný v napěťovém, v proudovém, nebo transkonduktančním a transimpedančním režimu [14]:

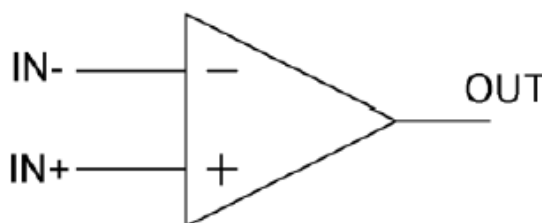
Tabulka 2.1: Možnosti využití operačního usměrňovače

| Pracovní mód | Jednocestný/ Dvoucestný | Odpory | Přenos |
|--|----------------------------|---------------|---------|
| Napěťový ($U \rightarrow U$) | J | $R_1 = R_2$ | 1 |
| | D | $R_1 = R_2/2$ | 1 |
| Proudový ($I \rightarrow I$) | J | $R_1 = R_2$ | 0,5 |
| | D | $R_2 = R_1/2$ | 1/3 |
| Transkonduktanční ($U \rightarrow I$) | J | $R_1 = R_2$ | $1/R_2$ |
| | D | $R_1 = R_2/2$ | $1/R_2$ |
| Transimpedanční ($I \rightarrow U$) | J | $R_1 = R_2$ | R_1 |
| | D | $R_1 = R_2/2$ | R_1 |

3 Komparátor

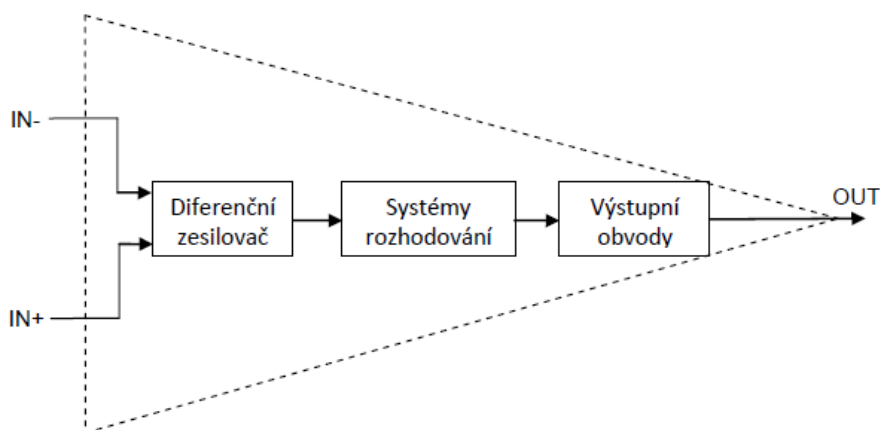
3.1 Komparátor obecně

Komparátor se dá definovat jako obvod, který porovnává různé dvě veličiny. Ty mohou být číselné (logické), nebo fyzikální (tlak, teplota, proud, napětí a jiné). U logických veličin dochází ke zpracování v (mikro)procesorových obvodech. Fyzikální veličiny porovnávají pomocí elektrických signálů napěťové komparátory. Takové zařízení porovnává dva proudy, nebo napětí a nastavuje výstup, aby ukázal, která z těchto veličin je větší. Z toho vyplývá, že na výstupu se mohou objevit pouze dvě hodnoty napětí, nízké a vysoké. Tedy z pohledu terminologie logických obvodů je to buď log 1 nebo log 0, popřípadě L (Low), nebo H (High) [11].



Obrázek 3.1: Obecná značka napěťového komparátoru

Od obecné značky, která je na **obrázku 3.1**, se odvíjí značky dalších mnoha typů. Mezi tyto značky mohou např. patřit značky s pomocnými řídicími a nastavovacími vstupy. Jako další nejrozšířenější značka je ta, která používá symboliku logických obvodů, kde je kolečkem označen invertující vstup, a v poslední řadě napěťový komparátor s diferenciálním vstupem [11].

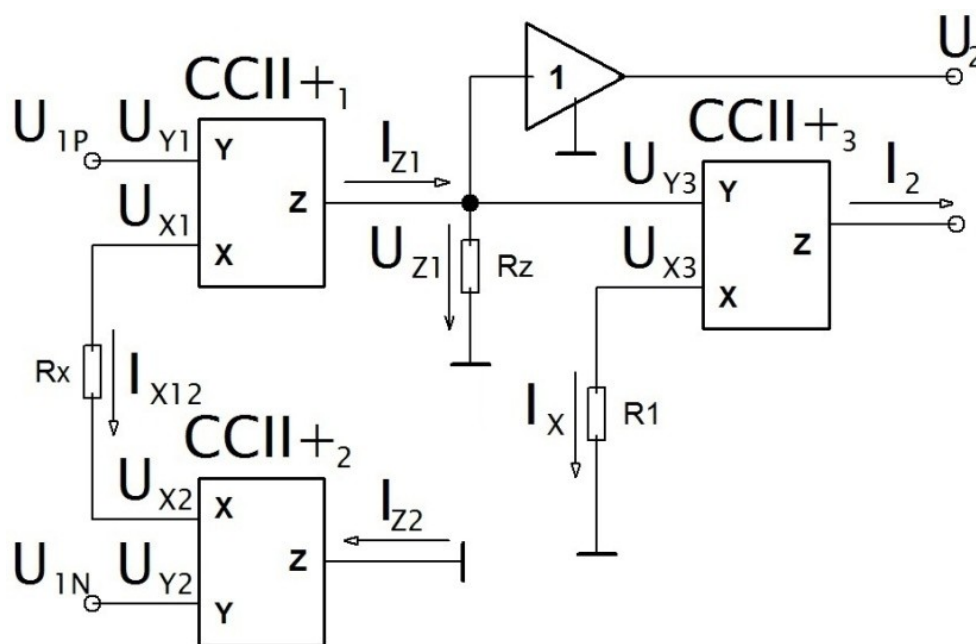


Obrázek 3.2: Vnitřní blokové schéma komparátoru

Blokové schéma komparátoru na **obrázku 3.2** má tři základní bloky, diferenční zesilovač, systémy rozhodování a výstupní obvody. Diferenční (rozdílový) zesilovač má za úkol zesilovat rozdílové, a také potlačovat souhlasné signály, kde takové signály jsou signály, které přichází současně na neinvertující a invertující vstup zesilovače a mají stejnou fázi a velikost. Po diferenčním zesilovači následuje blok rozhodování, ten udržuje ostrý přechod mezi logickými úrovněmi z jedné úrovně na druhou. Posledním blokem před výstupem jsou výstupní obvody, které jsou zde, aby zvládaly velké kapacitní zátěže [11].

3.2 Komparátor bez hystereze

Přivedené napětí U_{1P} a U_{1N} jsou rovna napětím U_{Y1} a U_{Y2} na svorkách Y, která jsou rovna napětím na svorce X, tedy napětím U_{X1} a U_{X2} . Napětí U_{Y3} na svorce Y je též rovno napětí U_{X3} na svorce X. Proud I_2 je vyveden ze svorky Z na konveju $CCII + 3$ a I_{Z2} je uzemněn. Výstupní napětí U_2 pak bude vyvedeno ze společného uzlu konveju $CCII + 1$ a $CCII + 3$, viz **obrázek 3.3** [15].



Obrázek 3.3: Schéma komparátoru bez hystereze

Ze schématu lze tedy odvodit, že napětí na svorkách Y a X si jsou rovna (**rovnice 3.1**):

$$U_{1P} = U_{Y1} = U_{X1}, U_{1N} = U_{Y2} = U_{X2}, U_{Y3} = U_{X3} \quad (3.1)$$

A proudy na svorkách X a Z také (**rovnice 3.2, rovnice 3.3 a rovnice 3.4**):

$$I_{X12} = I_{Z1} \quad (3.2)$$

$$I_{X12} = I_{Z2} \quad (3.3)$$

$$I_X = I_2 \quad (3.4)$$

Výstupní napětí U_2 lze pak vypočítat (**rovnice 3.7**):

$$U_2 = R_Z \cdot I_{Z2} = R_Z \cdot I_{X12} \quad (3.5)$$

$$U_2 = R_Z \cdot \frac{U_{1P} - U_{1N}}{R_X} \quad (3.6)$$

$$U_2 = \frac{R_Z}{R_X} \cdot (U_{1P} - U_{1N}) \quad (3.7)$$

Výstupní proud bude (**rovnice 3.9**):

$$I_2 = \frac{U_{Z1}}{R_1} = \frac{R_Z}{R_1} \cdot I_{Z1} \quad (3.8)$$

$$I_2 = \frac{R_Z}{R_X \cdot R_1} \cdot (U_{1P} - U_{1N}) \quad (3.9)$$

Pokud bude odpor $R_Z \gg R_X$, pak lze odvodit, že výstupní napětí pro $U_{1P} > U_{1N}$ bude (**rovnice 3.10**):

$$U_2 = U_{2SAT}^+ \quad (3.10)$$

A pro $U_{1P} < U_{1N}$ (**rovnice 3.11**):

$$U_2 = -U_{2SAT}^- \quad (3.11)$$

To samé bude platit pro proud I_2 při podmínce $U_{1P} > U_{1N}$ (**rovnice 3.12**):

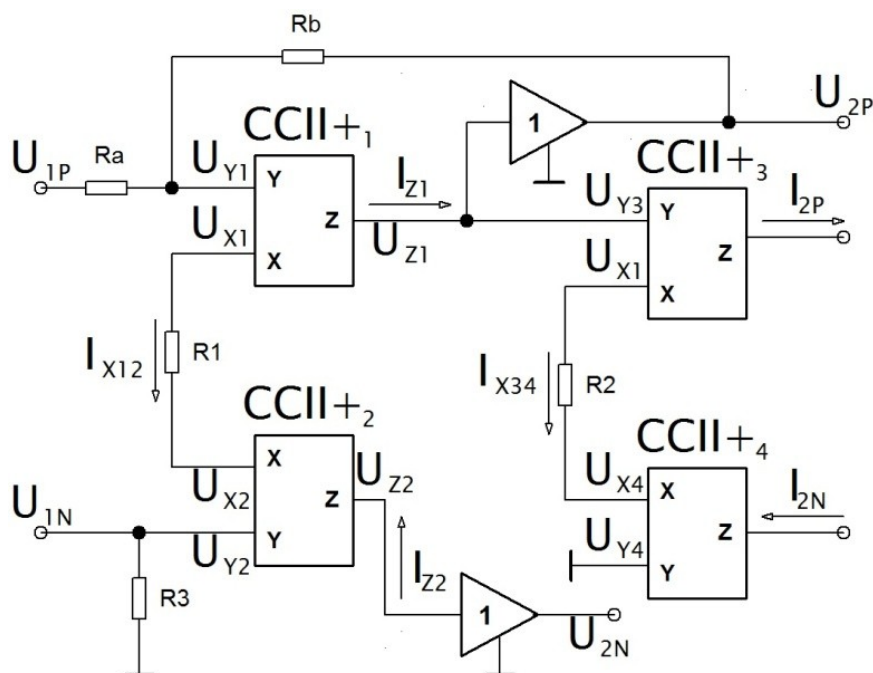
$$I_2 = \frac{U_{2SAT}^+}{R_1} \quad (3.12)$$

A také pro podmínku $U_{1P} < U_{1N}$ (**rovnice 3.13**):

$$I_2 = -\frac{U_{2SAT}^-}{R_1} \quad (3.13)$$

3.3 Komparátor s hysterezí

Přivedené napětí U_{1P} a U_{1N} jsou rovna napětím U_{Y1} a U_{Y2} na svorkách Y, která jsou rovna napětím na svorce X, tedy napětím U_{X1} a U_{X2} . Napětí U_{Y3} na svorce Y je také rovno napětí U_{X3} na svorce X, a napětí U_{Y4} , které je uzemněné, je rovno 0, a je stejné jako napětí U_{X4} . Proudů vtékajících nebo vytékajících ze svorek X a Z si budou též rovny, takže proud I_{X12} bude roven proudům I_{Z1} a I_{Z2} , a proud I_{X34} bude roven proudům I_{2P} a I_{2N} . Výstupní napětí U_{2P} pak bude vyvedeno přes zpětnou vazbu na konveju $CCII +_1$, a výstupní napětí U_{2N} pak ze svorky Z na konveju $CCII +_2$, viz **obrázek 3.4** [15].



Obrázek 3.4: Schéma komparátoru s hysterezí

Ze schématu lze tedy odvodit, že napětí na svorkách Y a X si jsou rovna (**rovnice 3.14**):

$$U_{Y1} = U_{X1}, U_{Y2} = U_{X2}, U_{Y3} = U_{X3}, U_{Y4} = U_{X4} \quad (3.14)$$

Z toho lze odvodit saturační napětí U_{Z1SAT} a referenční napětí U_{REF} (**rovnice 3.16 a rovnice 3.17**):

$$\pm U_{Z1SAT} = U_{Z1} \quad (3.15)$$

$$U_{Z1SAT} = +U_{2SAT}, U_{Z1SAT} = -U_{2SAT} \quad (3.16)$$

$$U_{REF} = U_{1P} \quad (3.17)$$

Poté lze zvolit pomocnou konstantu β a $1 - \beta$ (**rovnice 3.18 a rovnice 3.19**):

$$\beta = \frac{R_a}{R_a + R_b} \quad (3.18)$$

$$1 - \beta = \frac{R_b}{R_a + R_b} \quad (3.19)$$

Úbytek napětí U_{Y1} se vyjádří jako (**rovnice 3.21**):

$$U_{Y1} = \beta \cdot \left(\frac{R_b}{R_a} \cdot U_{REF} \pm U_{Z1SAT} \right) \quad (3.20)$$

$$U_{Y1} = (1 - \beta) \cdot U_{REF} + (\beta \cdot U_{Z1SAT}) \quad (3.21)$$

Napětí pro vysokou U_{KH} a nízkou U_{LH} hladinu pak bude (**rovnice 3.22 a rovnice 3.23**):

$$U_{KH} = (1 - \beta) \cdot U_{REF} + (\beta \cdot U_{2SAT}) \quad (3.22)$$

$$U_{KL} = (1 - \beta) \cdot U_{REF} - (\beta \cdot U_{2SAT}) \quad (3.23)$$

A pro hysterezní napětí (**rovnice 3.26**):

$$U_{HYS} = U_{KH} - U_{KL} \quad (3.24)$$

$$U_{HYS} = [(1 + \beta) \cdot U_{REF} + (\beta \cdot U_{2SAT})] - [(1 + \beta) \cdot U_{REF} + (\beta \cdot U_{2SAT})] \quad (3.25)$$

$$U_{HYS} = 2\beta \cdot U_{2SAT} \quad (3.26)$$

Napětí U_{1N} pak bude rovno (**rovnice 3.27 a rovnice 3.28**):

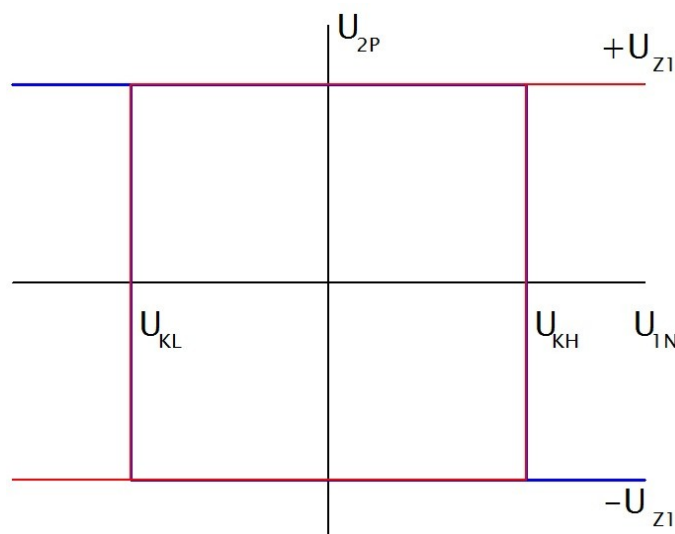
$$U_{1N} = U_{KH}, U_{1N} = U_{KL} \quad (3.27)$$

$$U_{1N} = U_{Y2} \quad (3.28)$$

Protože proudy I_{X12} a I_{X34} budou rovny 0 (**rovnice 3.29**):

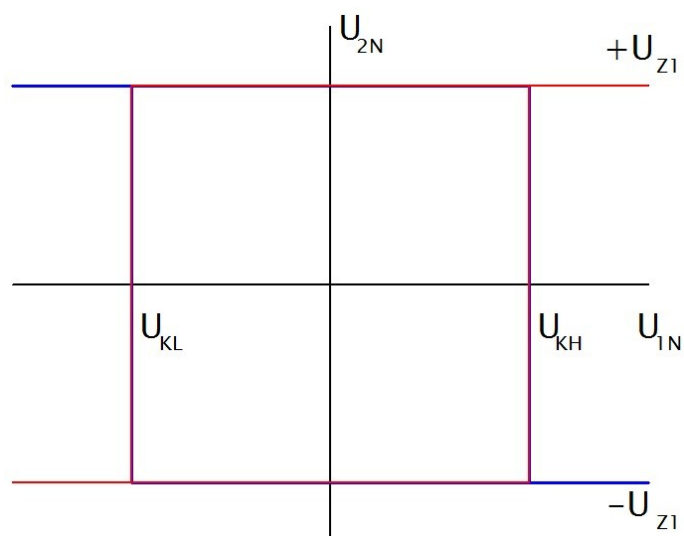
$$I_{X12} = I_{X34} = 0 \quad (3.29)$$

Na **obrázku 3.5** lze vidět převodní charakteristiku, která zobrazuje komparační úrovně pro vstupní napětí U_{1N} a výstupní napětí U_{2P} .



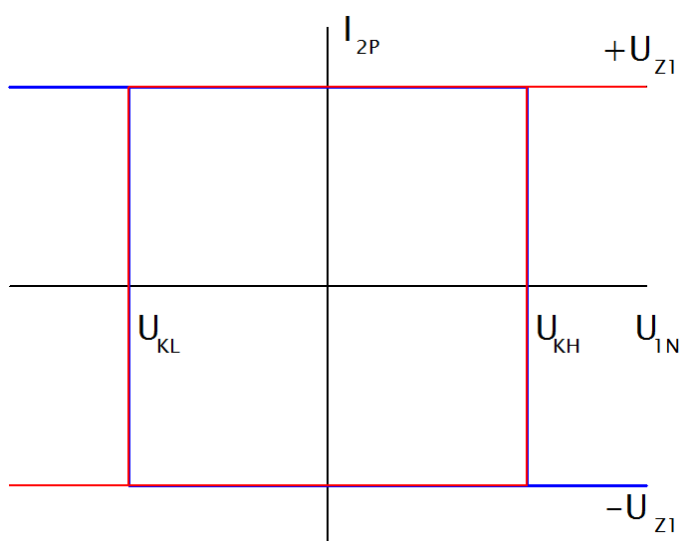
Obrázek 3.5: Převodní charakteristika invertujícího komparátoru

Na **obrázku 3.6** lze vidět převodní charakteristiku, která zobrazuje komparační úrovně pro vstupní napětí U_{1N} a výstupní napětí U_{2N} .



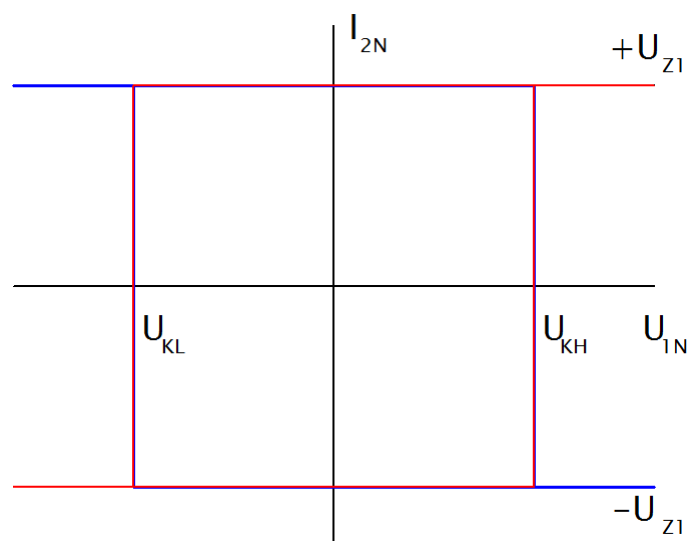
Obrázek 3.6: *Převodní charakteristika neinvertujícího komparátoru*

Na **obrázku 3.7** lze vidět převodní charakteristiku, která zobrazuje komparační úrovně pro vstupní napětí U_{1N} a výstupní proud I_{2P} .



Obrázek 3.7: *Převodní charakteristika invertujícího komparátoru*

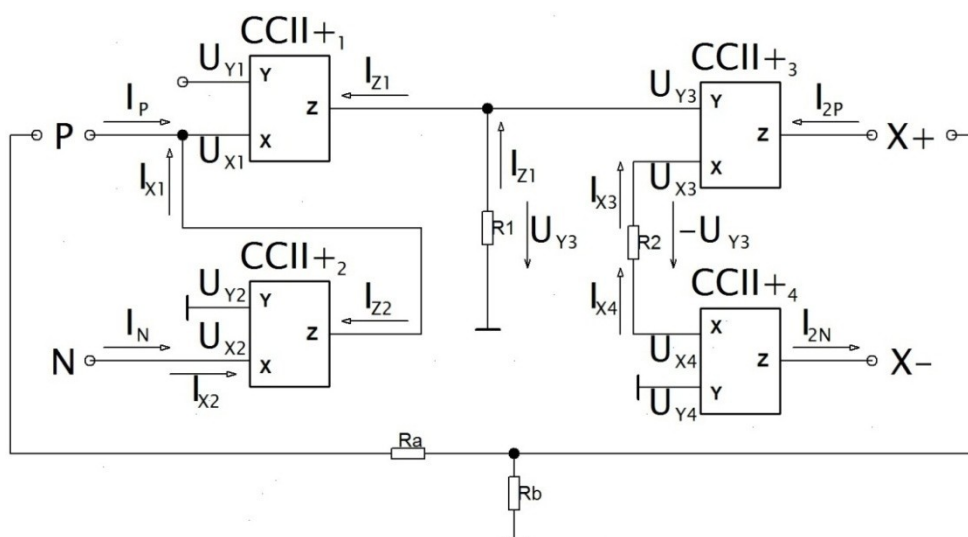
Na **obrázku 3.8** lze vidět převodní charakteristiku, která zobrazuje komparační úrovně pro vstupní napětí U_{1N} a výstupní proud I_{2N} .



Obrázek 3.8: Převodní charakteristika neinvertujícího komparátoru

3.4 Schmittův komparátor pracující v proudovém režimu

Napětí přivedené na svorkách Y budou rovna napětím na svorkách X, tedy napětí U_{Y1} , U_{Y2} a U_{Y4} jsou rovna napětím U_{X1} , U_{X2} a U_{X4} , která jsou uzemněna a budou rovna 0. Jediná svorka U_{Y3} , která není uzemněná je u konvejsoru $CCII+3$, je také rovna napětí U_{X3} na svorce X. Proudů vtékající nebo vytékající ze svorek X a Y si budou též rovny. Obvod se chová jako proudový dělič, proud vytečený ze svorky P vytváří úbytek napětí a přes zpětnou vazbu se dostává zpět na svorku X+. Aby došlo ke komparaci, musí se proudy I_N a I_P rovnat, viz **obrázek 3.9** [16].



Obrázek 3.9: Schéma Schmittova komparátoru pracující v proudovém režimu

Ze schématu lze tedy odvodit, že napětí na svorkách Y a X si jsou rovna (**rovnice 3.30**):

$$U_{Y1} = U_{X1} = 0, U_{Y2} = U_{X2} = 0, U_{Y4} = U_{X4} = 0, U_{Y3} = U_{X3} \quad (3.30)$$

Z toho lze odvodit úbytek napětí U_{Y3} (**rovnice 3.32**):

$$U_{Y3} = -R_1 \cdot I_{Z1} = -R_1 \cdot I_{X1} = -R_1 \cdot I_P - I_N \quad (3.31)$$

$$U_{Y3} = -R_1 \cdot I_P - I_N \quad (3.32)$$

Proud vtékající do konveju CCII +₁ lze vyjádřit (**rovnice 3.35**):

$$I_{X1} = \frac{U_{YST}}{R_1} = I_{Z1} = I_P \quad (3.33)$$

$$I_{X1} = I_{Z1} = I_P \quad (3.34)$$

$$I_{X1} = I_P - I_N \quad (3.35)$$

Stejně odvození proudu bude platit i pro konveju CCII +₂ (**rovnice 3.38**):

$$I_{X2} = \frac{U_{YST}}{R_1} = I_{Z2} = I_N \quad (3.36)$$

$$I_{X2} = I_{Z2} = I_N \quad (3.37)$$

$$I_{X2} = I_P - I_N \quad (3.38)$$

Díky odvozenému úbytku napětí lze vyjádřit rovnici pro proud I_{X3} (**rovnice 3.41**):

$$I_{X3} = \frac{-U_{Y3}}{R_2} = I_{2P} \quad (3.39)$$

$$I_{X3} = I_{2P} \quad (3.40)$$

$$I_{X3} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot (I_P - I_N) \quad (3.41)$$

A také pro proud I_{X4} (**rovnice 3.44**):

$$I_{X4} = \frac{U_{Y3}}{R_2} = I_{2N} \quad (3.42)$$

$$I_{X4} = I_{2N} \quad (3.43)$$

$$I_{X4} = \frac{R_1}{R_2} \cdot (I_P - I_N) \quad (3.44)$$

Pokud bude $R_1 \gg R_2$, lze určit proud pro vysokou I_{KH} a nízkou I_{KL} hladinu (**rovnice 3.45 a rovnice 3.46**):

$$I_{KH} = \frac{R_b}{R_a + R_b} \cdot I_{2P} \quad (3.45)$$

$$I_{KL} = -\frac{R_b}{R_a + R_b} \cdot I_{2P} \quad (3.46)$$

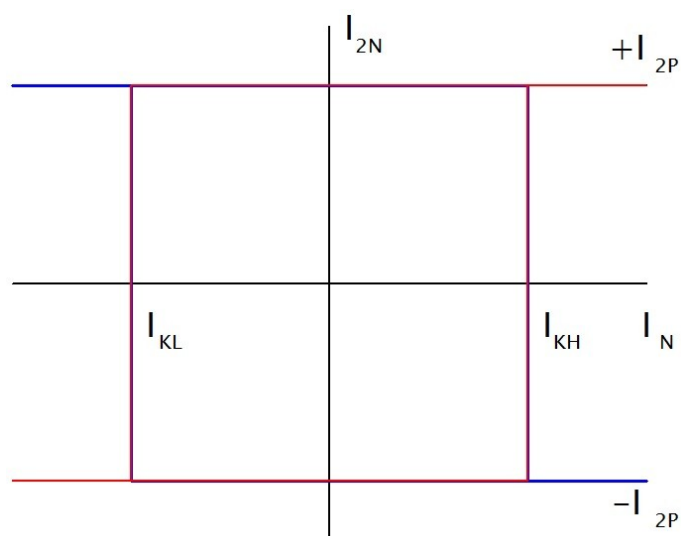
Výstupní proud I_{2P} pro svorku $X +$ se tedy bude rovnat (**rovnice 3.47**):

$$I_{2P} = \frac{R_1}{R_2} \cdot (I_P - I_N) \quad (3.47)$$

A výstupní proud I_{2N} pro svorku $X -$ (**rovnice 3.48**):

$$I_{2N} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot (I_P - I_N) \quad (3.48)$$

Na **obrázku 3.10** lze vidět převodní charakteristiku, která zobrazuje komparační úrovně pro vstupní proud I_N a výstupní proud I_{2N} .



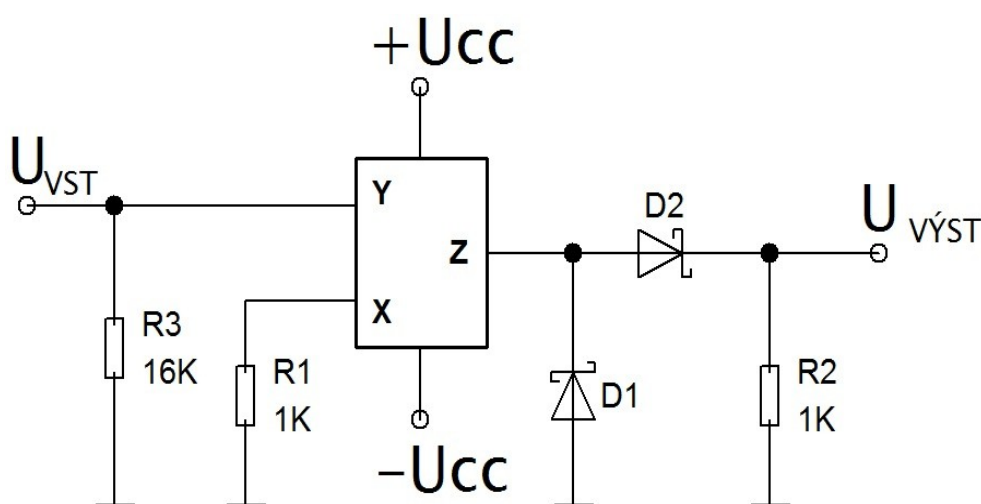
Obrázek 3.10: Převodní charakteristika Schmittova komparátoru

4 Experimentální ověřování

4.1 Jednocestný operační usměrňovač

4.1.1 Měření se statickým napětím

Při realizaci zapojení se na svorky $+U_{cc}$ a $-U_{cc}$ přivádí napětí 15V a na vstupu se pracuje s napětím $\pm 4V$. Schottkyho diody zde pracují v závěrném a propustném směru podle přivedeného buď kladného, nebo záporného vstupního napětí. Na vstupu je připojen pro zátěž odpor R_3 , a na odporu R_2 je měřeno výstupní napětí, viz **obrázek 4.1**. Bližší popis funkčnosti schématu lze nalézt v **kapitole 2.2.1 a 2.2.2**.



Obrázek 4.1: Schéma realizovaného zapojení jednocestného operačního usměrňovače

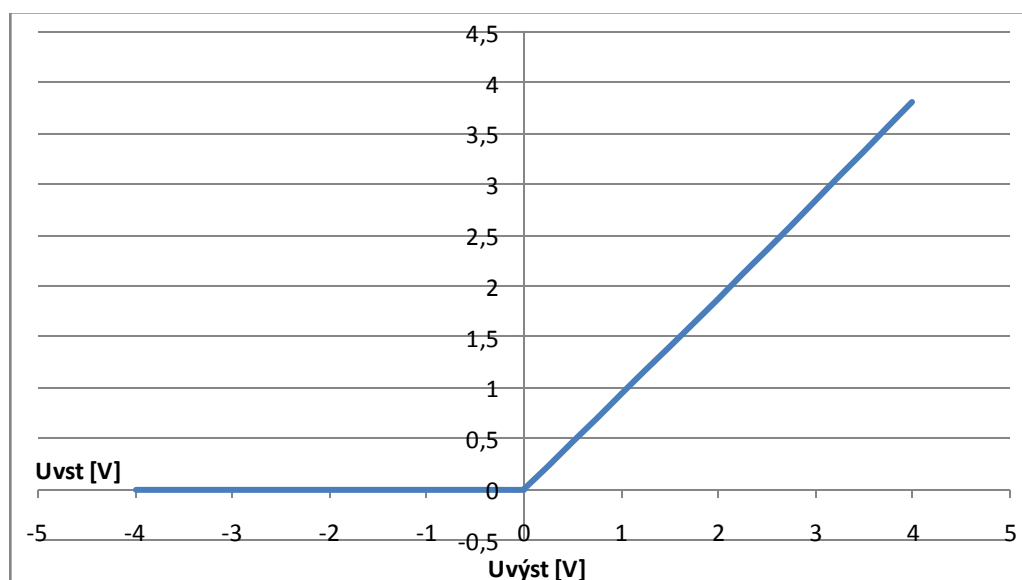
Pro přivedené vstupní záporné napětí U_{VST} bylo výstupní napětí U_{VYST} nulové a pro přivedené kladné vstupní napětí U_{VST} bylo výstupní napětí U_{VYST} téměř stejné. Krok měřeného napětí byl 0,25V, kde jednotlivé hodnoty pro určitá napětí jsou vyznačeny v **tabulce 4.1**.

Tabulka 4.1: Tabulka naměřených hodnot vstupního napětí na výstupní napětí

| U_{VST} [V] | U_{VYST} [V] |
|---------------------|----------------|
| -4 \rightarrow -0 | 0 |
| 0 | 0,008 |
| 0,25 | 0,235 |
| 0,5 | 0,473 |

| | |
|-------------|-------|
| 0,75 | 0,704 |
| 1 | 0,944 |
| 1,25 | 1,180 |
| 1,5 | 1,411 |
| 1,75 | 1,646 |
| 2 | 1,882 |
| 2,25 | 2,127 |
| 2,5 | 2,363 |
| 2,75 | 2,604 |
| 3 | 2,850 |
| 3,25 | 3,096 |
| 3,5 | 3,336 |
| 3,75 | 3,583 |
| 4 | 3,827 |

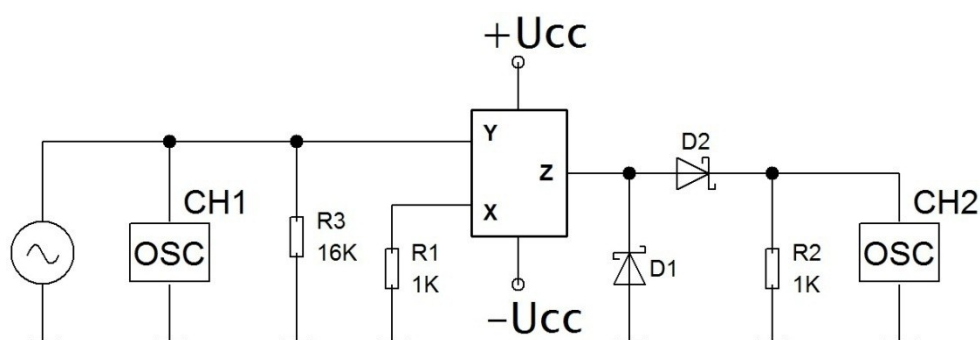
Grafické znázornění měřených veličin z **tabulky 4.1** lze vidět na **obrázku 4.2**, kde je zobrazena statická převodní charakteristika.



Obrázek 4.2: *Statická převodní charakteristika jednocestného operačního usměrňovače*

4.1.2 Měření s dynamickým napětím

Při realizaci zapojení se na svorky $+U_{cc}$ a $-U_{cc}$ přivádí napětí 15V a na vstup se z generátoru přivádí napětí U_{pp} 1V. Schottkyho diody zde pracují v závěrném a propustném směru podle přivedeného buď kladného, nebo záporného vstupního napětí. Na vstupu je připojen pro zátěž odpor R_3 , generátor generující jednotlivé frekvence a kanál jedna CH1 vedoucí z osciloskopu. Na výstup, tedy zátěž R_2 , je připojen kanál dva CH2 z osciloskopu, který zobrazuje pro jednotlivě generované frekvence z generátoru efektivní hodnotu, střední hodnotu a maximální napětí, viz **obrázek 4.3**.



Obrázek 4.3: Schéma realizovaného zapojení jednocestného operačního usměrňovače

Čím větší frekvenci generátor generoval, tím menší byly měřené parametry a signál, který osciloskop zobrazoval, byl zkreslený. Frekvence generované z generátoru a výstupní hodnoty lze vidět v **tabulce 4.2**.

Tabulka 4.2: Tabulka naměřených hodnot generátoru vzhledem k osciloskopu

| Frekvence [kHz] | $U_{2STŘ}$ [mV] | U_{2EF} [mV] |
|-----------------|-----------------|----------------|
| 0,1 | 312 | 480 |
| 0,5 | 312 | 480 |
| 1 | 294 | 462 |
| 5 | 237 | 419 |
| 10 | 314 | 486 |
| 50 | 306 | 480 |
| 100 | 304 | 479 |
| 500 | 283 | 445 |

| | | |
|--------------|------|------|
| 1000 | 266 | 399 |
| 2000 | 252 | 332 |
| 3000 | 230 | 280 |
| 4000 | 211 | 245 |
| 5000 | 190 | 215 |
| 10000 | 70,4 | 78,4 |

Z naměřených hodnot v **tabulce 4.2** lze určit střední hodnotu, efektivní hodnotu, absolutní chybu a relativní chybu. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v **příloze B**.

Pro skutečnou hodnotu (naměřená hodnota při frekvenci $f = 100\text{Hz}$) bude střední a efektivní hodnota:

$$U_{2ST\check{R}_{100\text{Hz}}} = 312 \text{ mV} \quad (4.1)$$

$$U_{2EF_{100\text{Hz}}} = 480 \text{ mV} \quad (4.2)$$

Pro naměřenou hodnotu při frekvenci $f = 500\text{KHz}$ bude střední a efektivní hodnota:

$$U_{2ST\check{R}_{500\text{KHz}}} = 283 \text{ mV} \quad (4.3)$$

$$U_{2EF_{500\text{KHz}}} = 445 \text{ mV} \quad (4.4)$$

Absolutní chyba měření tedy bude:

$$\Delta U_{2ST\check{R}} = U_{2ST\check{R}_{500\text{KHz}}} - U_{2ST\check{R}_{100\text{Hz}}} = 283 - 312 \quad (4.5)$$

$$\Delta U_{2ST\check{R}} = -29 \text{ mV} \quad (4.6)$$

$$\Delta U_{2EF} = U_{2EF_{500\text{KHz}}} - U_{2EF_{100\text{Hz}}} = 445 - 480 \quad (4.7)$$

$$\Delta U_{2EF} = -35 \text{ mV} \quad (4.8)$$

A relativní chyba:

$$\delta_{ST\check{R}} = \frac{\Delta U_{2ST\check{R}}}{U_{2ST\check{R}_{100\text{Hz}}}} \cdot 100\% = \frac{-29}{312} \cdot 100\% = -0,093 \cdot 100\% \quad (4.9)$$

$$\delta_{ST\check{R}} = -9,3\% \quad (4.10)$$

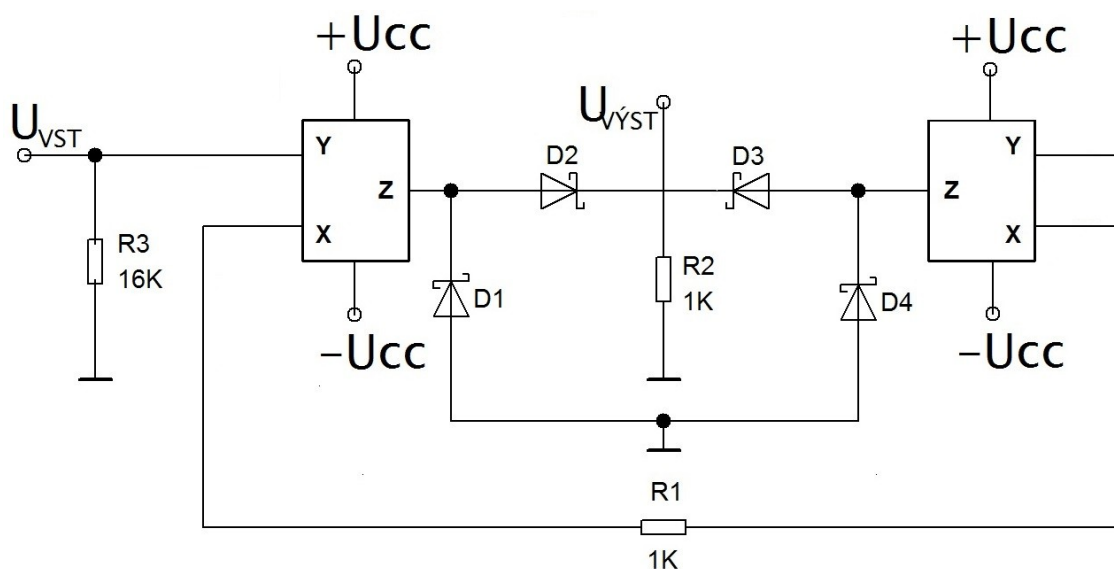
$$\delta_{EF} = \frac{\Delta U_{2EF}}{U_{2EF_{100\text{Hz}}}} \cdot 100\% = \frac{-35}{480} \cdot 100\% = -0,073 \cdot 100\% \quad (4.11)$$

$$\delta_{EF} = -7,3\% \quad (4.12)$$

4.2 Dvoucestný operační usměrňovač

4.2.1 Měření se statickým napětím

Při realizaci zapojení se na svorky $+U_{cc}$ a $-U_{cc}$ přivádí napětí 15V a na vstupu se pracuje s napětím $\pm 4V$. Schottkyho diody zde pracují v závěrném a propustném směru podle přivedeného buď kladného, nebo záporného vstupního napětí. Na vstupu je připojen pro zátěž odpor R_3 a na odporu R_2 je měřeno výstupní napětí, viz **obrázek 4.4**. Bližší popis funkčnosti schématu lze nalézt v **kapitole 2.3.1 a 2.3.2**.



Obrázek 4.4: Schéma realizovaného zapojení dvoucestného operačního usměrňovače

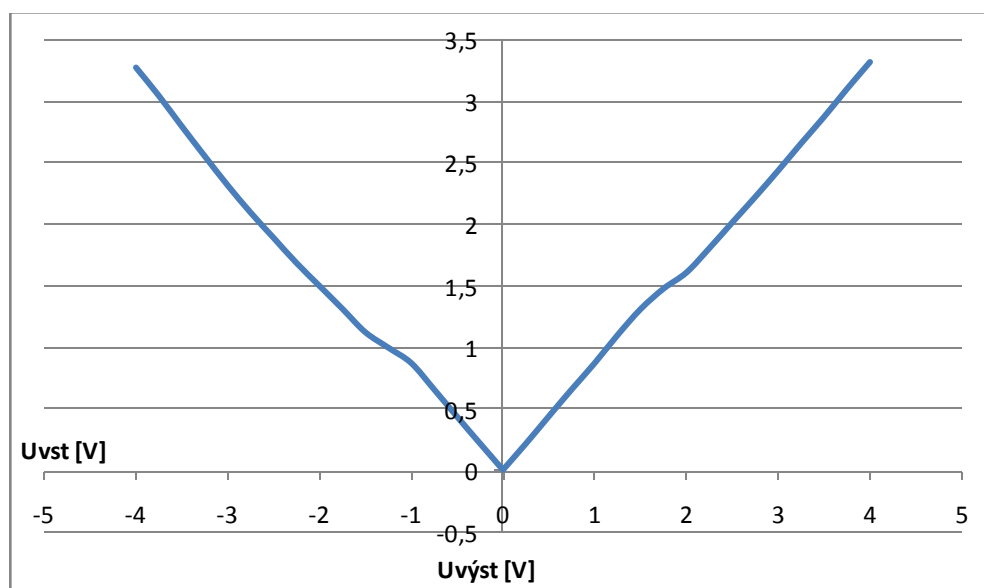
Pro přivedené vstupní záporné napětí U_{VST} se výstupní napětí U_{VYST} pohybovalo v kladných hodnotách a pro přivedené kladné vstupní napětí U_{VST} bylo výstupní napětí U_{VYST} také v kladných hodnotách. Krok měřeného napětí byl 0,25V, kde jednotlivé hodnoty pro určité napětí jsou vyznačeny v **tabulce 4.3**.

Tabulka 4.3: Tabulka naměřených hodnot vstupního napětí na výstupní napětí

| U_{VST} [V] | U_{VYST} [V] | U_{VST} [V] | U_{VYST} [V] |
|---------------|----------------|---------------|----------------|
| -0 | 0,008 | 0 | 0,009 |
| -0,25 | 0,223 | 0,25 | 0,222 |
| -0,5 | 0,440 | 0,5 | 0,444 |

| | | | |
|-------|-------|------|-------|
| -0,75 | 0,661 | 0,75 | 0,663 |
| -1 | 0,876 | 1 | 0,876 |
| -1,25 | 1,001 | 1,25 | 1,104 |
| -1,5 | 1,126 | 1,5 | 1,314 |
| -1,75 | 1,316 | 1,75 | 1,480 |
| -2 | 1,502 | 2 | 1,611 |
| -2,25 | 1,688 | 2,25 | 1,809 |
| -2,5 | 1,892 | 2,5 | 2,018 |
| -2,75 | 2,097 | 2,75 | 2,225 |
| -3 | 2,318 | 3 | 2,439 |
| -3,25 | 2,555 | 3,25 | 2,660 |
| -3,5 | 2,797 | 3,5 | 2,875 |
| -3,75 | 3,045 | 3,75 | 3,102 |
| -4 | 3,275 | 4 | 3,320 |

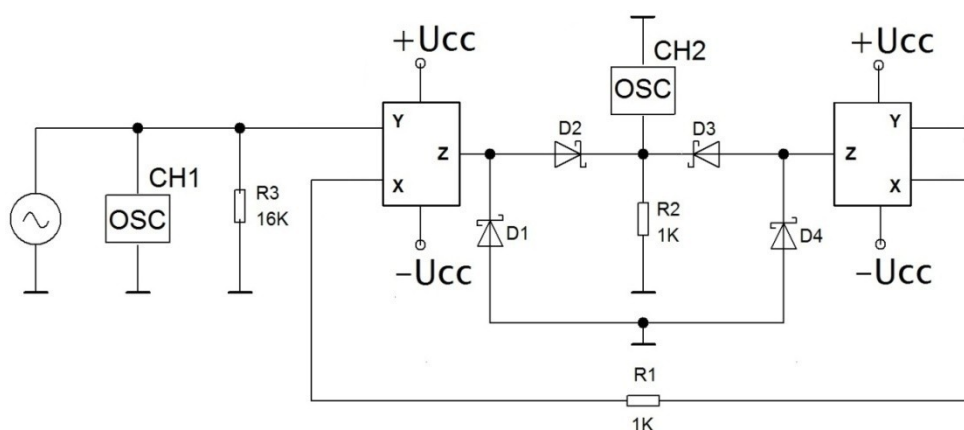
Grafické znázornění měřených veličin lze vidět na **obrázku 4.5**, kde je zobrazena statická převodní charakteristika.



Obrázek 4.5: Statická převodní charakteristika dvoucestného operačního usměrňovače

4.2.2 Měření s dynamickým napětím

Při realizaci zapojení se na svorky $+U_{cc}$ a $-U_{cc}$ přivádí napětí 15V a na vstup se z generátoru přivádí napětí U_{pp} 1V. Schottkyho diody zde pracují v závěrném a propustném směru podle přivedeného buď kladného, nebo záporného vstupního napětí. Na vstupu je připojen pro zátěž odpor R_3 , generátor generující jednotlivé frekvence a kanál jedna CH1 vedoucí z osciloskopu. Na výstup, tedy zátěž R_2 , je připojen kanál dva CH2 z osciloskopu, který zobrazuje pro jednotlivě generované frekvence z generátoru efektivní hodnotu, střední hodnotu a maximální napětí, viz **obrázek 4.6**.



Obrázek 4.6: Schéma realizovaného zapojení jednocestného operačního usměrňovače

Čím větší frekvenci generátor generoval, tím menší byly měřené parametry a signál, který osciloskop zobrazoval, byl zkreslený. Frekvence generované z generátoru a výstupní hodnoty lze vidět v **tabulce 4.4**.

Tabulka 4.4: Tabulka naměřených hodnot generátoru vzhledem k osciloskopu

| Frekvence [kHz] | $U_{2STŘ}$ [mV] | U_{2EF} [mV] |
|-----------------|-----------------|----------------|
| 0,1 | 581 | 642 |
| 0,5 | 580 | 641 |
| 1 | 581 | 642 |
| 5 | 570 | 631 |
| 10 | 569 | 630 |
| 50 | 569 | 630 |

| | | |
|-------------|-----|-----|
| 100 | 569 | 630 |
| 500 | 556 | 604 |
| 1000 | 534 | 563 |
| 2000 | 471 | 485 |
| 3000 | 419 | 427 |
| 4000 | 378 | 383 |
| 5000 | 336 | 339 |

Z naměřených hodnot v **tabulce 4.4** lze určit střední hodnotu, efektivní hodnotu, absolutní chybu a relativní chybu. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v **příloze C**.

Pro skutečnou hodnotu (naměřená hodnota při frekvenci $f = 100\text{Hz}$) bude střední a efektivní hodnota:

$$U_{2ST\check{R}_{100Hz}} = 581\text{ mV} \quad (4.13)$$

$$U_{2EF_{100Hz}} = 642\text{ mV} \quad (4.14)$$

Pro naměřenou hodnotu při frekvenci $f = 500\text{KHz}$ bude střední a efektivní hodnota:

$$U_{2ST\check{R}_{500KHz}} = 556\text{ mV} \quad (4.15)$$

$$U_{2EF_{500KHz}} = 604\text{ mV} \quad (4.16)$$

Absolutní chyba měření tedy bude:

$$\Delta U_{2ST\check{R}} = U_{2ST\check{R}_{500KHz}} - U_{2ST\check{R}_{100Hz}} = 556 - 581 \quad (4.17)$$

$$\Delta U_{2ST\check{R}} = -25\text{ mV} \quad (4.18)$$

$$\Delta U_{2EF} = U_{2EF_{500KHz}} - U_{2EF_{100Hz}} = 604 - 642 \quad (4.19)$$

$$\Delta U_{2EF} = -38\text{ mV} \quad (4.20)$$

A relativní chyba:

$$\delta_{ST\check{R}} = \frac{\Delta U_{2ST\check{R}}}{U_{2ST\check{R}_{100Hz}}} \cdot 100\% = \frac{-25}{581} \cdot 100\% = -0,043 \cdot 100\% \quad (4.21)$$

$$\delta_{ST\check{R}} = -4,3\% \quad (4.22)$$

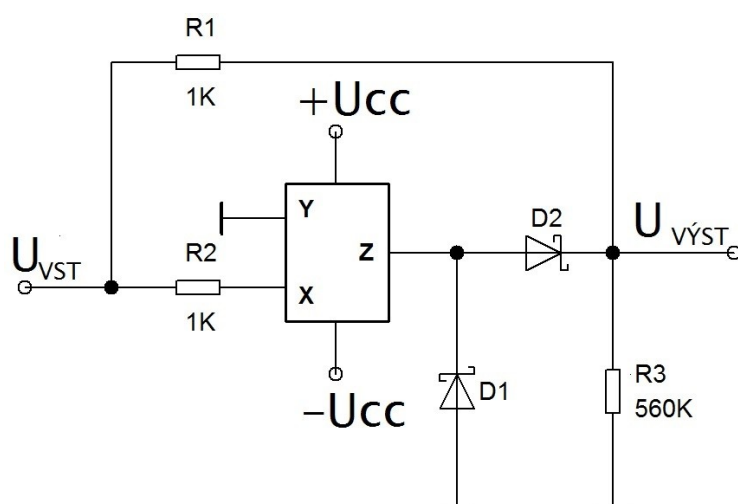
$$\delta_{EF} = \frac{\Delta U_{2EF}}{U_{2EF_{100Hz}}} \cdot 100\% = \frac{-38}{642} \cdot 100\% = -0,059 \cdot 100\% \quad (4.23)$$

$$\delta_{EF} = -5,9\% \quad (4.24)$$

4.3 Jednocestný operační usměrňovač s proudovým sledovačem

4.3.1 Měření se statickým napětím

Při realizaci zapojení se na svorky $+U_{cc}$ a $-U_{cc}$ přivádí napětí 15V a na vstupu se pracuje s napětím $\pm 4V$. Schottkyho diody zde pracují v závěrném a propustném směru podle přivedeného buď kladného, nebo záporného vstupního napětí. Na vstupu je připojena zpětná vazba, odpor R_2 a na odporu R_3 je měřeno výstupní napětí, viz **obrázek 4.7**. Bližší popis funkčnosti schématu lze nalézt v **kapitole 2.4.1 a 2.4.2**.



Obrázek 4.7: Schéma realizovaného zapojení jednocestného operačního usměrňovače s proudovým sledovačem

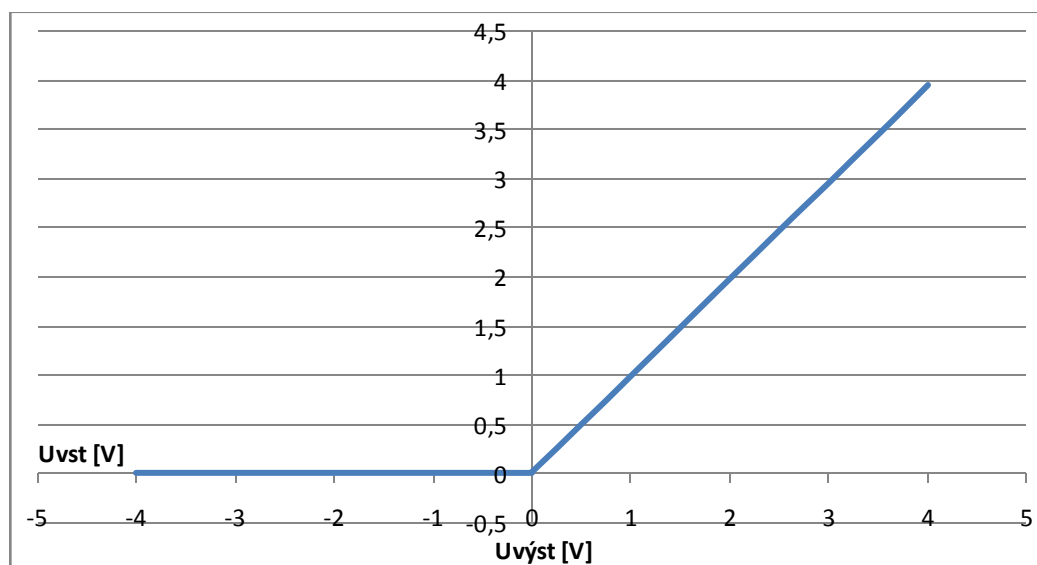
Pro přivedené vstupní záporné napětí U_{VST} bylo výstupní napětí U_{VYST} nulové a pro přivedené kladné vstupní napětí U_{VST} bylo výstupní napětí U_{VYST} téměř stejné. Krok měřeného napětí byl 0,25V, kde jednotlivé hodnoty pro určité napětí jsou vyznačeny v **tabulce 4.5**.

Tabulka 4.5: Tabulka naměřených hodnot vstupního napětí na výstupní napětí

| U_{VST} [V] | U_{VYST} [V] |
|---------------|----------------|
| -4 → -0 | 0 |
| 0 | 0,009 |
| 0,25 | 0,250 |
| 0,5 | 0,496 |
| 0,75 | 0,739 |
| 1 | 0,989 |

| | |
|-------------|-------|
| 1,25 | 1,235 |
| 1,5 | 1,484 |
| 1,75 | 1,733 |
| 2 | 1,981 |
| 2,25 | 2,226 |
| 2,5 | 2,474 |
| 2,75 | 2,718 |
| 3 | 2,959 |
| 3,25 | 3,208 |
| 3,5 | 3,453 |
| 3,75 | 3,702 |
| 4 | 3,956 |

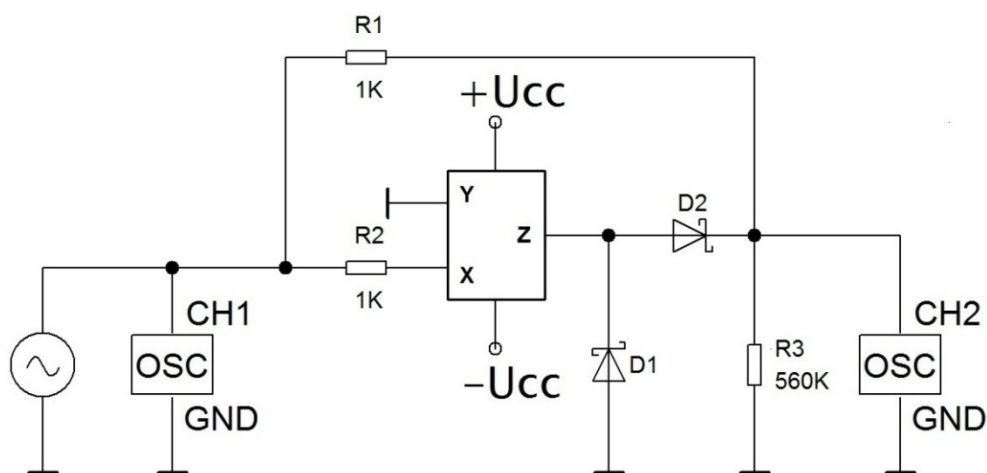
Grafické znázornění měřených veličin lze vidět na **obrázku 4.8**, kde je zobrazena statická převodní charakteristika.



Obrázek 4.8: *Statická převodní charakteristika jednocestného operačního usměrňovače s proudovým sledovačem*

4.3.2 Měření s dynamickým napětím

Při realizaci zapojení se na svorky $+U_{cc}$ a $-U_{cc}$ přivádí napětí 15V a na vstup se z generátoru přivádí napětí U_{pp} 1V. Schottkyho diody zde pracují v závěrném a propustném směru podle přivedeného buď kladného, nebo záporného vstupního napětí. Na vstupu je připojen pro zátěž odpor R_3 , generátor generující jednotlivé frekvence a kanál jedna CH1 vedoucí z osciloskopu. Na výstup, tedy zátěž R_2 , je připojen kanál dva CH2 z osciloskopu, který zobrazuje pro jednotlivě generované frekvence z generátoru efektivní hodnotu, střední hodnotu a maximální napětí, viz **obrázek 4.9**.



Obrázek 4.9: Schéma realizovaného zapojení jednocestného operačního usměrňovače s proudovým sledovačem

Čím větší frekvenci generátor generoval, tím menší byly měřené parametry a signál, který osciloskop zobrazoval, byl zkreslený. Frekvence generované z generátoru a výstupní hodnoty lze vidět v **tabulce 4.6**.

Tabulka 4.6: Tabulka naměřených hodnot generátoru vzhledem k osciloskopu

| Frekvence [kHz] | U_{2SR} [mV] | U_{2EF} [mV] |
|-----------------|----------------|----------------|
| 0,1 | 336 | 521 |
| 0,5 | 309 | 500 |
| 1 | 278 | 470 |
| 5 | 299 | 499 |
| 10 | 261 | 463 |

| | | |
|--------------|-----|-----|
| 50 | 254 | 456 |
| 100 | 318 | 510 |
| 500 | 325 | 493 |
| 1000 | 294 | 437 |
| 2000 | 233 | 329 |
| 3000 | 215 | 279 |
| 4000 | 199 | 247 |
| 5000 | 185 | 221 |
| 10000 | 116 | 138 |

Z naměřených hodnot v **tabulce 4.6** lze určit střední hodnotu, efektivní hodnotu, absolutní chybu a relativní chybu. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v **příloze D**.

Pro skutečnou hodnotu (naměřená hodnota při frekvenci $f = 100\text{Hz}$) bude střední a efektivní hodnota:

$$U_{2ST\check{R}_{100\text{Hz}}} = 336 \text{ mV} \quad (4.25)$$

$$U_{2EF_{100\text{Hz}}} = 521 \text{ mV} \quad (4.26)$$

Pro naměřenou hodnotu při frekvenci $f = 500\text{KHz}$ bude střední a efektivní hodnota:

$$U_{2ST\check{R}_{500\text{KHz}}} = 325 \text{ mV} \quad (4.27)$$

$$U_{2EF_{500\text{KHz}}} = 493 \text{ mV} \quad (4.28)$$

Absolutní chyba měření tedy bude:

$$\Delta U_{2ST\check{R}} = U_{2ST\check{R}_{500\text{KHz}}} - U_{2ST\check{R}_{100\text{Hz}}} = 325 - 336 \quad (4.29)$$

$$\Delta U_{2ST\check{R}} = -11 \text{ mV} \quad (4.30)$$

$$\Delta U_{2EF} = U_{2EF_{500\text{KHz}}} - U_{2EF_{100\text{Hz}}} = 493 - 521 \quad (4.31)$$

$$\Delta U_{2EF} = -28 \text{ mV} \quad (4.32)$$

A relativní chyba:

$$\delta_{ST\check{R}} = \frac{\Delta U_{2ST\check{R}}}{U_{2ST\check{R}_{100\text{Hz}}}} \cdot 100\% = \frac{-11}{336} \cdot 100\% = -0,033 \cdot 100\% \quad (4.33)$$

$$\delta_{ST\check{R}} = -3,3\% \quad (4.34)$$

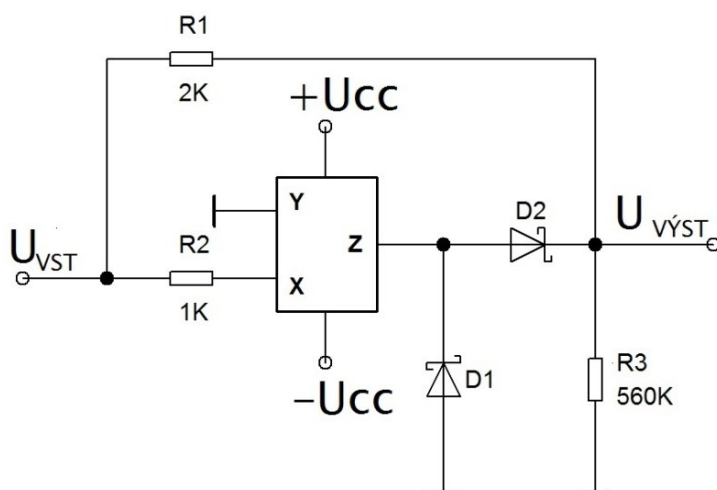
$$\delta_{EF} = \frac{\Delta U_{2EF}}{U_{2EF_{100\text{Hz}}}} \cdot 100\% = \frac{-28}{521} \cdot 100\% = -0,054 \cdot 100\% \quad (4.35)$$

$$\delta_{EF} = -5,4\% \quad (4.36)$$

4.4 Dvoucestný operační usměrňovač s proudovým sledovačem

4.4.1 Měření se statickým napětím

Při realizaci zapojení se na svorky $+U_{cc}$ a $-U_{cc}$ přivádí napětí 15V a na vstupu se pracuje s napětím $\pm 4V$. Schottkyho diody zde pracují v závěrném a propustném směru podle přivedeného buď kladného, nebo záporného vstupního napětí. Na vstupu je připojena zpětná vazba, odpor R_2 , a na odporu R_3 je měřeno výstupní napětí, viz **obrázek 4.10**. Bližší popis funkčnosti schématu lze nalézt v **kapitole 2.4.1 a 2.4.2**, kde je popisován jednocestný operační usměrňovač s proudovým sledovačem, ale platí i pro tento obvod, protože jediný rozdíl je v hodnotě odporu R_1 , která je dvakrát větší, tudíž se jedná o dvoucestný operační usměrňovač s proudovým sledovačem.



Obrázek 4.10: Schéma realizovaného zapojení dvoucestného operačního usměrňovače

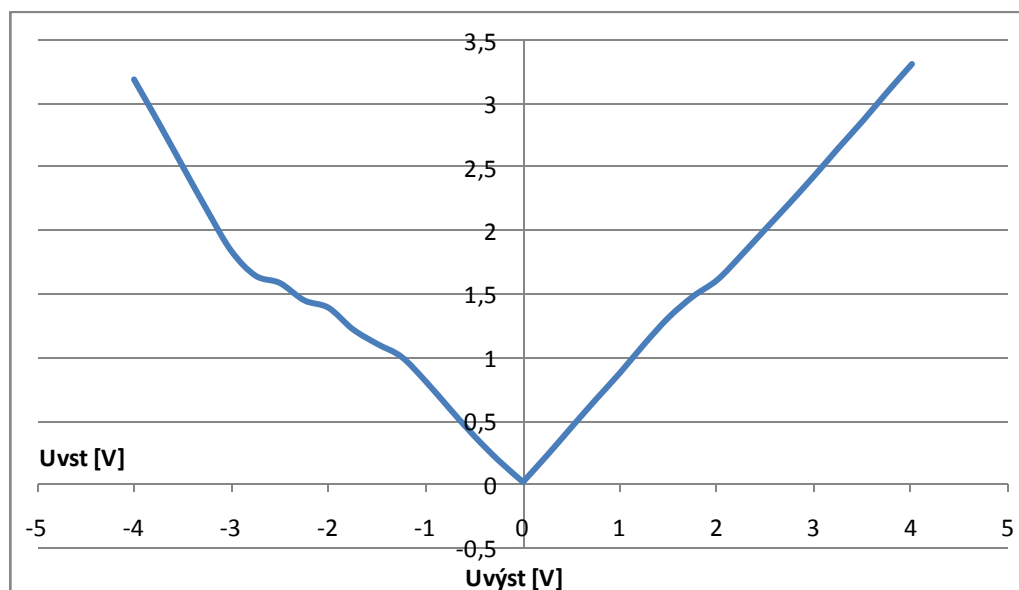
Pro přivedené vstupní záporné napětí U_{VST} se výstupní napětí U_{VYST} pohybovalo v kladných hodnotách a pro přivedené kladné vstupní napětí U_{VST} bylo výstupní napětí U_{VYST} také v kladných hodnotách. Krok měřeného napětí byl 0,25V, kde jednotlivé hodnoty pro určité napětí jsou vyznačeny v **tabulce 4.7**.

Tabulka 4.7: Tabulka naměřených hodnot vstupního napětí na výstupní napětí

| U_{VST} [V] | U_{VYST} [V] | U_{VST} [V] | U_{VYST} [V] |
|---------------|----------------|---------------|----------------|
| -0 | 0,009 | 0 | 0,009 |

| | | | |
|--------------|-------|-------------|-------|
| -0,25 | 0,179 | 0,25 | 0,247 |
| -0,5 | 0,372 | 0,5 | 0,489 |
| -0,75 | 0,586 | 0,75 | 0,731 |
| -1 | 0,806 | 1 | 0,981 |
| -1,25 | 1,001 | 1,25 | 1,218 |
| -1,5 | 1,103 | 1,5 | 1,465 |
| -1,75 | 1,219 | 1,75 | 1,711 |
| -2 | 1,389 | 2 | 1,948 |
| -2,25 | 1,448 | 2,25 | 2,201 |
| -2,5 | 1,585 | 2,5 | 2,437 |
| -2,75 | 1,643 | 2,75 | 2,683 |
| -3 | 1,840 | 3 | 2,937 |
| -3,25 | 2,164 | 3,25 | 3,174 |
| -3,5 | 2,510 | 3,5 | 3,422 |
| -3,75 | 2,859 | 3,75 | 3,660 |
| -4 | 3,198 | 4 | 3,901 |

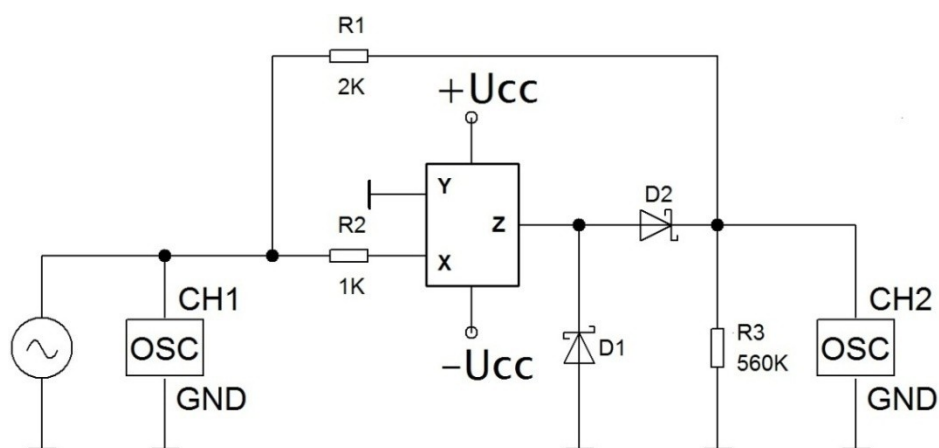
Grafické znázornění měřených veličin lze vidět na **obrázku 4.11**, kde je zobrazena statická převodní charakteristika.



Obrázek 4.11: Statická převodní charakteristika dvoucestného operačního usměrňovače

4.4.2 Měření s dynamickým napětím

Při realizaci zapojení se na svorky $+U_{cc}$ a $-U_{cc}$ přivádí napětí 15V a na vstup se z generátoru přivádí napětí U_{PP} 1V. Schottkyho diody zde pracují v závěrném a propustném směru, podle přivedeného buď kladného, nebo záporného vstupního napětí. Na vstupu je připojena zpětná vazba, generátor generující jednotlivé frekvence a kanál CH1 vedoucí z osciloskopu. Na výstup, tedy zátěž R_3 , je připojen kanál dva CH2 z osciloskopu, který zobrazuje pro jednotlivě generované frekvence z generátoru efektivní hodnotu, střední hodnotu a maximální napětí, viz **obrázek 4.12**.



Obrázek 4.12: Schéma realizovaného zapojení jednocestného operačního usměrňovače

Čím větší frekvenci generátor generoval, tím menší byly měřené parametry a signál, který osciloskop zobrazoval, byl zkreslený. Frekvence generované z generátoru a výstupní hodnoty lze vidět v **tabulce 4.8**.

Tabulka 4.8: *Tabulka naměřených hodnot generátoru vzhledem k osciloskopu*

| Frekvence [kHz] | $U_{2ST\check{R}}$ [mV] | U_{2EF} [mV] |
|------------------------|---|----------------------------------|
| 0,1 | 559 | 628 |
| 0,5 | 547 | 612 |
| 1 | 558 | 626 |
| 5 | 546 | 615 |
| 10 | 542 | 612 |
| 50 | 531 | 597 |
| 100 | 537 | 603 |
| 500 | 520 | 551 |
| 1000 | 488 | 503 |
| 2000 | 443 | 449 |
| 3000 | 402 | 406 |
| 4000 | 365 | 368 |
| 5000 | 334 | 336 |
| 10000 | 195 | 197 |

Z naměřených hodnot v **tabulce 4.8** lze určit střední hodnotu, efektivní hodnotu, absolutní chybu a relativní chybu. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v **příloze E**.

Pro skutečnou hodnotu (naměřená hodnota při frekvenci $f = 100\text{Hz}$) bude střední a efektivní hodnota:

$$U_{2ST\check{R}_{100\text{Hz}}} = 559 \text{ mV} \quad (4.37)$$

$$U_{2EF_{100\text{Hz}}} = 628 \text{ mV} \quad (4.38)$$

Pro naměřenou hodnotu při frekvenci $f = 500\text{KHz}$ bude střední a efektivní hodnota:

$$U_{2ST\check{R}_{500\text{KHz}}} = 520 \text{ mV} \quad (4.39)$$

$$U_{2EF500KHz} = 551 \text{ mV} \quad (4.40)$$

Absolutní chyba měření tedy bude:

$$\Delta U_{2ST\check{R}} = U_{2ST\check{R}500KHz} - U_{2ST\check{R}100Hz} = 520 - 559 \quad (4.41)$$

$$\Delta U_{2ST\check{R}} = -39 \text{ mV} \quad (4.42)$$

$$\Delta U_{2EF} = U_{2EF500KHz} - U_{2EF100Hz} = 551 - 628 \quad (4.43)$$

$$\Delta U_{2EF} = -37 \text{ mV} \quad (4.44)$$

A relativní chyba:

$$\delta_{ST\check{R}} = \frac{\Delta U_{2ST\check{R}}}{U_{2ST\check{R}100Hz}} \cdot 100\% = \frac{-39}{559} \cdot 100\% = -0,070 \cdot 100\% \quad (4.45)$$

$$\delta_{ST\check{R}} = -7\% \quad (4.46)$$

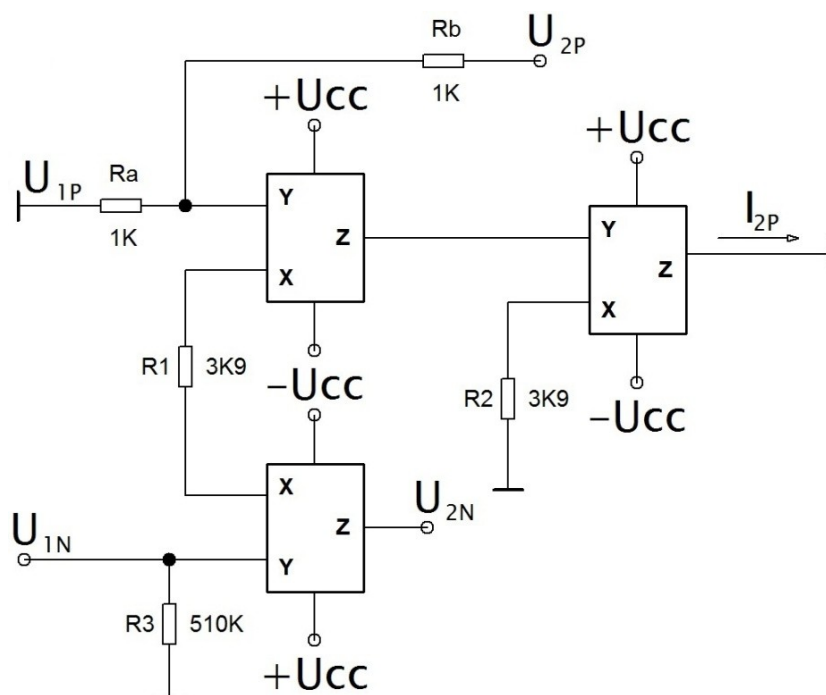
$$\delta_{EF} = \frac{\Delta U_{2EF}}{U_{2EF100Hz}} \cdot 100\% = \frac{-37}{628} \cdot 100\% = -0,059 \cdot 100\% \quad (4.47)$$

$$\delta_{EF} = -5,9\% \quad (4.48)$$

4.5 Komparátor s hysterezí

4.5.1 Měření se statickým napětím

Při realizaci zapojení se na svorky $+U_{cc}$ a $-U_{cc}$ přivádí napětí 15V a na vstupu se pracuje s napětím $\pm 4V$. Na vstupu je připojen pro zátěž odpor R_a , a zpětná vazba s odporem R_b , kde je přivedeno výstupní napětí U_{2P} . Výstupní proud I_{2P} na neinvertujícím konveju je uzemněn, a výstupní napětí U_{2N} je vyvedeno ze svorky Z na invertujícím konveju, viz **obrázek 4.13**. Bližší popis funkčnosti schématu lze nalézt v **kapitole 3.3**.



Obrázek 4.13: Schéma realizovaného zapojení komparátoru s hysterezí

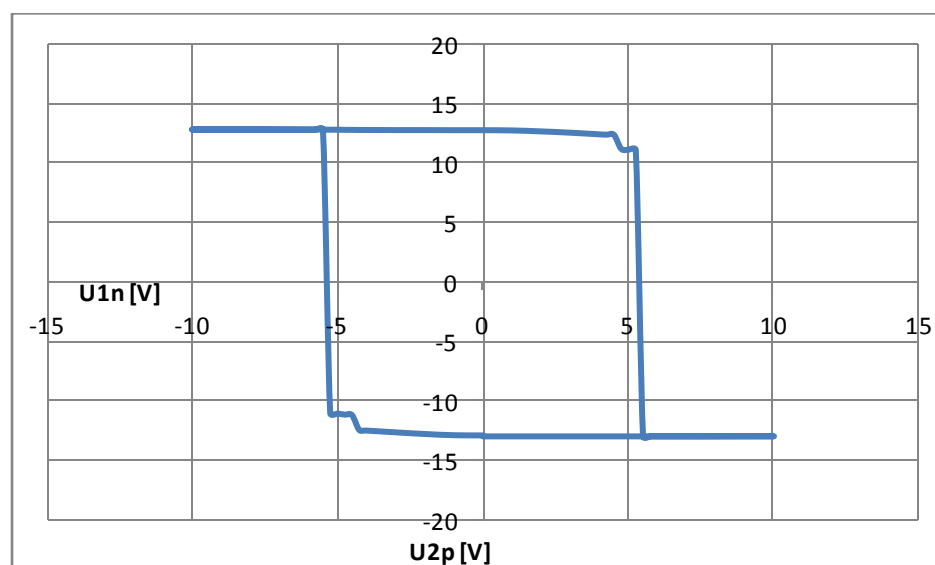
Vstupní napětí U_{1P} je uzemněno. Pro přivedené vstupní záporné napětí U_{1N} je výstupní napětí U_{2P} v záporných hodnotách a výstupní napětí U_{2N} v kladných až do hodnoty $-5,25V$, kdy se napětí překlápí a mění polaritu. Výstupní napětí zůstává stejné polarity, i když vstupní napětí se mění na kladné, a znovu se překlápí zpět při hodnotě $5,25V$. Hodnoty výstupních napětí U_{2P} pro invertující komparátor jsou vyznačeny v **tabulce 4.9** a pro neinvertující v **tabulce 4.10**.

Tabulka 4.9: Tabulka naměřených hodnot vstupního napětí na výstupní napětí

| U_{1N} | U_{2P} | U_{1N} | U_{2P} | U_{1N} | U_{2P} | U_{1N} | U_{2P} |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0 | -12,9 | -10 | 12,90 | 0 | 12,84 | 10 | -12,97 |
| -1 | -12,88 | -9 | 12,90 | 1 | 12,82 | 9 | -12,97 |
| -2 | -12,78 | -8 | 12,90 | 2 | 12,74 | 8 | -12,97 |
| -3 | -12,64 | -7 | 12,89 | 3 | 12,63 | 7 | -12,97 |
| -4 | -12,49 | -6 | 12,89 | 4 | 12,49 | 6 | -12,97 |
| -4,25 | -12,45 | -5,75 | 12,89 | 4,25 | 12,46 | 5,75 | -12,97 |
| -4,5 | -11,19 | -5,5 | 12,88 | 4,5 | 12,45 | 5,5 | -12,98 |
| -4,75 | -11,15 | -5,25 | 12,88 | 4,75 | 11,27 | 5,25 | -12,98 |

| | | | | | | | |
|-------|--------|-------|-------|------|--------|------|--------|
| -5 | -11,05 | -5 | 12,87 | 5 | 11,19 | 5 | -12,98 |
| -5,25 | -11,03 | -4,75 | 12,87 | 5,25 | 11,17 | 4,75 | -12,98 |
| -5,5 | 12,89 | -4,5 | 12,86 | 5,5 | -12,98 | 4,5 | -12,98 |
| -5,75 | 12,89 | -4,25 | 12,86 | 5,75 | -12,98 | 4,25 | -12,98 |
| -6 | 12,89 | -4 | 12,85 | 6 | -12,98 | 4 | -12,98 |
| -7 | 12,89 | -3 | 12,85 | 7 | -12,98 | 3 | -12,98 |
| -8 | 12,90 | -2 | 12,84 | 8 | -12,98 | 2 | -12,98 |
| -9 | 12,90 | -1 | 12,84 | 9 | -12,97 | 1 | -12,98 |
| -10 | 12,90 | 0 | 12,84 | 10 | -12,97 | 0 | -12,98 |

Grafické znázornění měřených veličin pro invertující komparátor lze vidět na **obrázku 4.14**, kde je zobrazena statická převodní charakteristika.



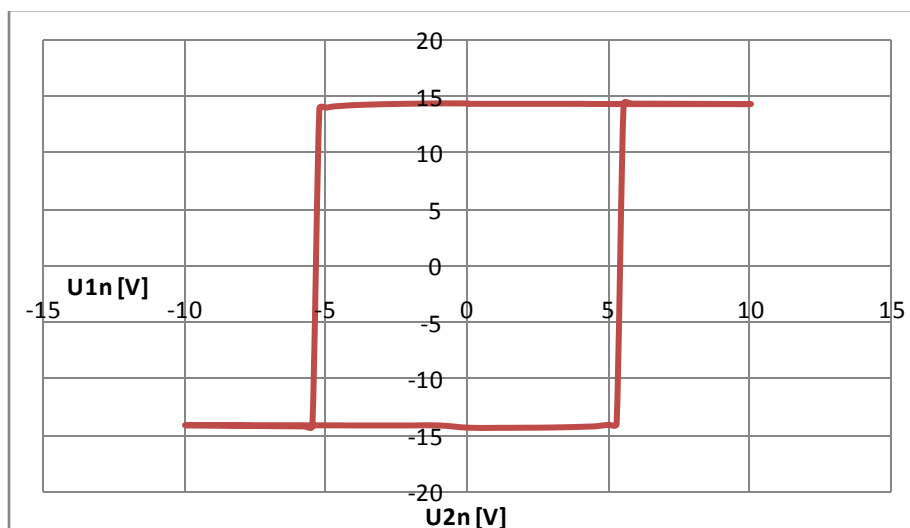
Obrázek 4.14: Statická převodní charakteristika invertujícího komparátoru

Tabulka 4.10: Tabulka naměřených hodnot vstupního napětí na výstupní napětí

| U_{1N} | U_{2N} | U_{1N} | U_{2N} | U_{1N} | U_{2N} | U_{1N} | U_{2N} |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0 | 14,45 | -10 | -14,05 | 0 | -14,27 | 10 | 14,39 |
| -1 | 14,45 | -9 | -14,05 | 1 | -14,28 | 9 | 14,39 |

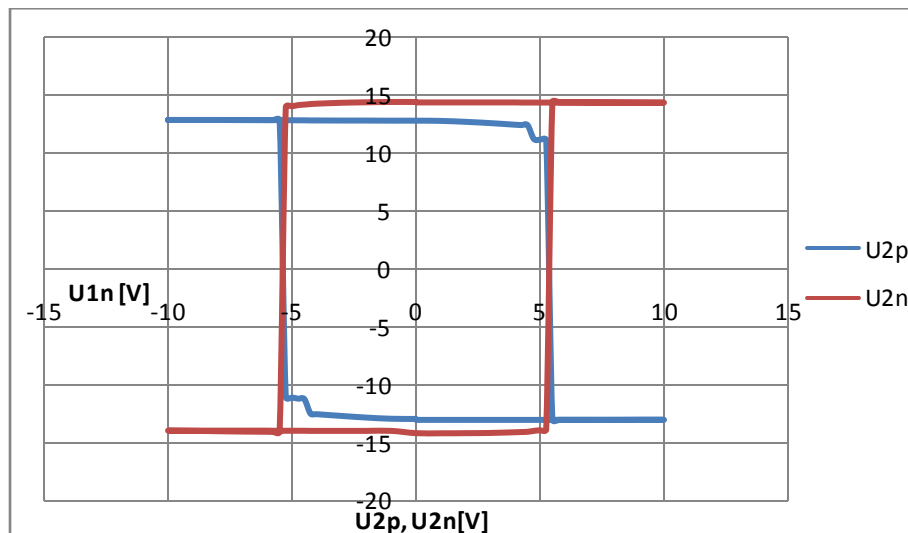
| | | | | | | | |
|-------|--------|-------|--------|------|--------|------|-------|
| -2 | 14,42 | -8 | -14,05 | 2 | -14,27 | 8 | 14,39 |
| -3 | 14,38 | -7 | -14,05 | 3 | -14,25 | 7 | 14,39 |
| -4 | 14,30 | -6 | -14,05 | 4 | -14,19 | 6 | 14,39 |
| -4,25 | 14,27 | -5,75 | -14,06 | 4,25 | -14,17 | 5,75 | 14,39 |
| -4,5 | 14,22 | -5,5 | -14,06 | 4,5 | -14,15 | 5,5 | 14,40 |
| -4,75 | 14,18 | -5,25 | -14,06 | 4,75 | -14,07 | 5,25 | 14,40 |
| -5 | 14,07 | -5 | -14,06 | 5 | -14,01 | 5 | 14,40 |
| -5,25 | 14,01 | -4,75 | -14,06 | 5,25 | -13,95 | 4,75 | 14,40 |
| -5,5 | -14,16 | -4,5 | -14,06 | 5,5 | 14,44 | 4,5 | 14,40 |
| -5,75 | -14,16 | -4,25 | -14,07 | 5,75 | 14,43 | 4,25 | 14,40 |
| -6 | -14,15 | -4 | -14,07 | 6 | 14,43 | 4 | 14,41 |
| -7 | -14,13 | -3 | -14,07 | 7 | 14,42 | 3 | 14,41 |
| -8 | -14,10 | -2 | -14,07 | 8 | 14,41 | 2 | 14,41 |
| -9 | -14,07 | -1 | -14,07 | 9 | 14,40 | 1 | 14,41 |
| -10 | -14,05 | 0 | -14,27 | 10 | 14,39 | 0 | 14,41 |

Grafické znázornění měřených veličin pro neinvertující komparátor lze vidět na **obrázku 4.15**, kde je zobrazena statická převodní charakteristika.



Obrázek 4.15: Statická převodní charakteristika neinvertujícího komparátoru

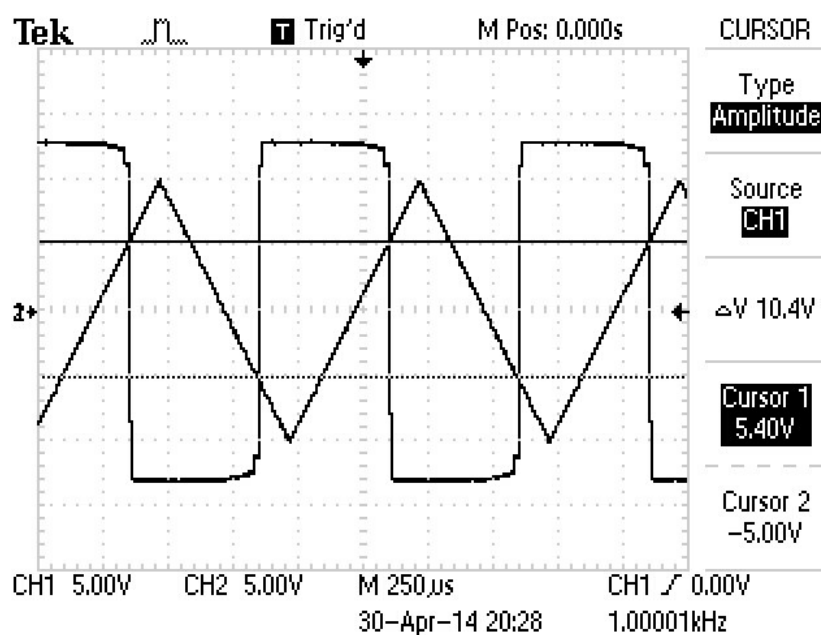
Na **obrázku 4.16** lze vidět celkové grafické znázornění statické převodní charakteristiky pro komparátor s hysterezí.



Obrázek 4.16: Statická převodní charakteristika komparátoru s hysterezí

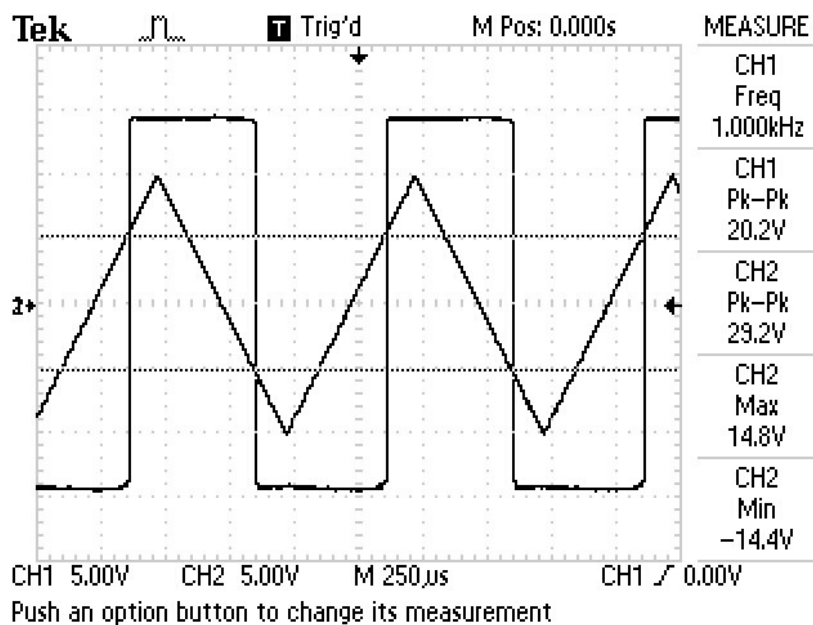
4.5.2 Měření s dynamickým napětím

Při realizaci zapojení se na svorky $+U_{cc}$ a $-U_{cc}$ přivádí napětí 15V a na vstup se z generátoru přivádí napětí U_{pp} 10V. Na vstupu je zátěž R_3 , generátor generující jednotlivé frekvence, a kanál jedna CH1 vedoucí z osciloskopu. Na výstup invertujícího komparátoru, tedy zátěž R_b , je připojen kanál dva jedna CH2₁ z osciloskopu a na výstup neinvertujícího komparátoru je připojen kanál dva dva CH2₂ z osciloskopu, viz **obrázek 4.17**. Kanály dva jedna CH2₁ a dva dva CH2₂ zobrazují pilový průběh při frekvenci $f = 1\text{KHz}$, kdy dochází ke komparaci napětí.

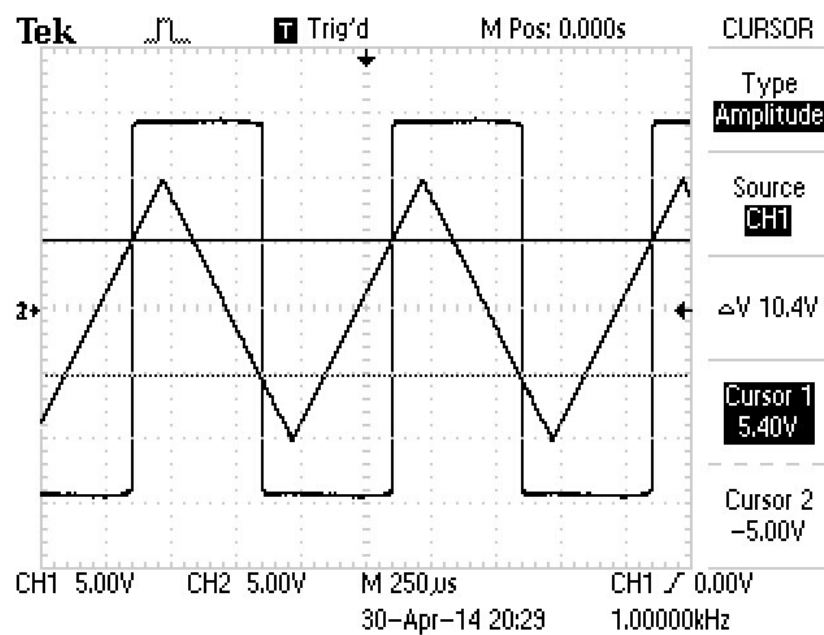


Obrázek 4.19: Nastavení kurzorů na komparační napětí

Na **obrázku 4.20** lze vidět obrázek z osciloskopu pro neinvertující komparátor, který zobrazuje špička-špička napětí, tedy napětí mezi nejmenší a největší hodnotou, pro kanál jedna CH1, kanál dva CH2, maximální a minimální napětí kanálu dva CH2. U **obrázku 4.21** je vidět nastavení kurzorů do bodu, kdy dochází ke komparaci napětí.



Obrázek 4.20: Průběh neinvertujícího komparátoru



Obrázek 4.21: Nastavení kurzorů na komparační napětí

5 Závěr

Úkolem této bakalářské práce bylo vypracovat přehled aktivních prvků pracujících v proudovém a smíšeném režimu, přehled aplikací těchto prvků při realizaci nelineárních obvodů, jako jsou komparátory, operační usměrňovače a jejich uvedená zapojení experimentálně ověřit.

Hlavním stavebním prvkem v této práci byl komerčně dostupný pozitivní proudový konvektor druhé generace, což je vlastně operační zesilovač s označením AD844, se kterým jsem realizoval zapojení jednocestný operační usměrňovač, dvoucestný operační usměrňovač, operační usměrňovač s proudovým sledovačem a komparátor s hysterezí.

V teoretické navrhovací části jsem pro každý z uvedených obvodů navrhl schéma, popsal jeho funkčnost, odvodil potřebné vzorce a srovnal vstupní napětí s výstupním napětím, protože všechna navržená schémata pracují s přivedeným kladným, nebo záporným napětím. Při navrhování všech schémat a odvozování vztahů se vycházelo z ideálního modelu proudového konvektoru.

U ověřování teoreticky navržených schémat jsem v experimentálním ověření prováděl modifikace potřebné ke správné funkčnosti obvodu. Zapojení byla realizována na nepájivé plošné desce. Měření u všech obvodů probíhalo pro statické nebo dynamické napětí. U statického napětí bylo přiváděno na vstupu kladné nebo záporné napětí a u dynamického měření byla přiváděna frekvence z generátoru, která byla promítnuta na osciloskop. Ze všech naměřených hodnot jsem zpracoval tabulky, grafy, popřípadě vypočítal absolutní a relativní chybu měření. Při ověřování všech obvodů jsem došel k závěru, že výsledné statické převodní charakteristiky nejsou vždy tak ideální, jako při teoreticky navržených obvodech. Tyto chyby měření mohly být způsobeny zapojení součástek o nepřesných hodnotách, různé délky kabelů s různým odporem a také lidskou chybou. Pro všechna dynamické měření jsou v příloze uvedeny průběhy z osciloskopů, které toto tvrzení potvrzují. Ověření operačních usměrňovačů ukázalo, že jsou přijatelné pro využití do frekvence 500kHz. Ve vyšších frekvencích už docházelo k velkému zkreslení signálu, které lze vidět v příloze B, C, D a E. Při spočtení relativní a absolutní chyby jsem došel k závěru, že obvody vykazují chybovost do -10%, jenž je z hlediska použití v praxi velmi dobré. Díky ověření funkčnosti jednotlivých zapojení lze tedy říci, že využití pozitivního proudového konvektoru druhé generace, potvrdilo univerzálnost stavebního prvku k realizaci lineárních, i nelineárních obvodů jako jsou operační usměrňovače a komparátory.

Přínosem této bakalářské práce je bližší pochopení funkčnosti proudových konvektorů jako aktivních prvků při realizaci obvodů operačního usměrňovače a komparátoru.

Seznam použité literatury

- [1] SEDRA, A. S. - ROBERTS, G. W. - GOHH, I.: The current conveyor: history progress and *new results*. IEEE PROCEEDINGS, Vol. 137, Pt. G, No. 2, April 1990, p.p. 78 – 87
- [2] SEDRA, A., SMITH, K. C.: A second generation current conveyor and its applications. IEEE Trans. Circuit Theory, 1970, Vol. 17, pp. 132-134.
- [3] SEDRA, Adel S a Kenneth C SMITH. Microelectronic circuits. 6th ed. New York: Oxford University Press, 2009, xxxiii, 1397 s. Oxford series in electrical and computer engineering. ISBN 978-0-19-532303-0.
- [4] ČAJKA, Josef, Tomáš DOSTÁL a Kamil VRBA. Nové názvosloví a sjednocující pohled na *proudové konvejory* [online]. 2001[cit. 2012-04-30]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01024/index.html>
- [5] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 5. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2002, 495 s. ISBN 80-730-0059-8.
- [6] BEČVÁŘ, Daniel a Kamil VRBA. *Univerzální proudový konvektor* [online]. 2000[cit. 2014-04-02] Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00007/index.html>
- [7] HERENCŠÁR, Norbert a Kamil VRBA. Obecný přístup k návrhu kmitočtových filtrů pomocí *autonomních obvodů* [online]. 2006[cit. 2014-04-02]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/06040/index.html>
- [8] ŠULÁK, Radek. Elektronické obvody s moderními aktivními prvky. Ostrava, 2012. Dostupné z: <http://dspace.vsb.cz/handle/10084/93040>. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Pavel Brandštetter.
- [9] KOTON, Jaroslav a Kamil VRBA. Pure Current-Mode Frequency Filter for Signal Processing in *High-Speed Data Communication* [online]. 2007[cit. 2012-05-03]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04196306>
- [10] VRBA, Kamil a Pavel BUCHMAIER. Vlastnosti bipolárních proudových zrcadel. [online]. 1999 [cit. 2014-03-06]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/99014/index.html>
- [11] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 154 s. ISBN 80-730-0184-5.
- [12] MACHÁČEK, Marek. *Modernizace laboratorních úloh z předmětu Elektronika* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2014-03-31]. Dostupné z:

<http://dspace.vsb.cz/handle/10084/87413?show=full>. Baka lářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.

- [13] BRTNÍK, Bohumil. *Analogové soustavy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2013, 175 s. ISBN 978-80-7300-490-3.
- [14] Přesné usměřovače s proudovým buzením diod a vliv závěrné zotavovací doby diod na jejich funkci [online]. 2010 [cit. 2014-04-03]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://elektrorevue.cz/cz/clanky/analogova-technika--vzajemny-a-d-prevod/15/presne-usmernovace-s-proudovym-buzenim-diod-a-vliv-zaverne-zotavovaci-doby-diod-na-jejich-funkci/>
- [15] BIOLEK, Dalibor a Viera BIOLKOVÁ. Current-Mode CDTA-Based Comparators. *Current-Mode CDTA-Based Comparators* [online]. [cit. 2014-04-03]. Dostupné z: <http://user.unob.cz/biolek/veda/articles/EDS06.pdf>
- [16] MIŠUREC, Jiří a Jaroslav KOTON. Schmitt Trigger with Controllable Hysteresis Using Current Conveyors. Schmitt Trigger with Controllable Hysteresis Using Current Conveyors [online]. 2012, Vol 1, No 1 [cit. 2014-04-03]. Dostupné z: <http://www.ijates.org/index.php/ijates/article/download/9/63>

Seznam příloh

- Příloha A: *Katalogový list operačního zesilovače AD844*
- Příloha B: *Dynamická přechodová charakteristika pro jednocestný operační usměrňovač*
- Příloha C: *Dynamická přechodová charakteristika pro dvoucestný operační usměrňovač*
- Příloha D: *Dynamická přechodová charakteristika pro jednocestný operační usměrňovač s proudovým sledovačem*
- Příloha E: *Dynamická přechodová charakteristika pro dvoucestný operační usměrňovač s proudovým sledovačem*